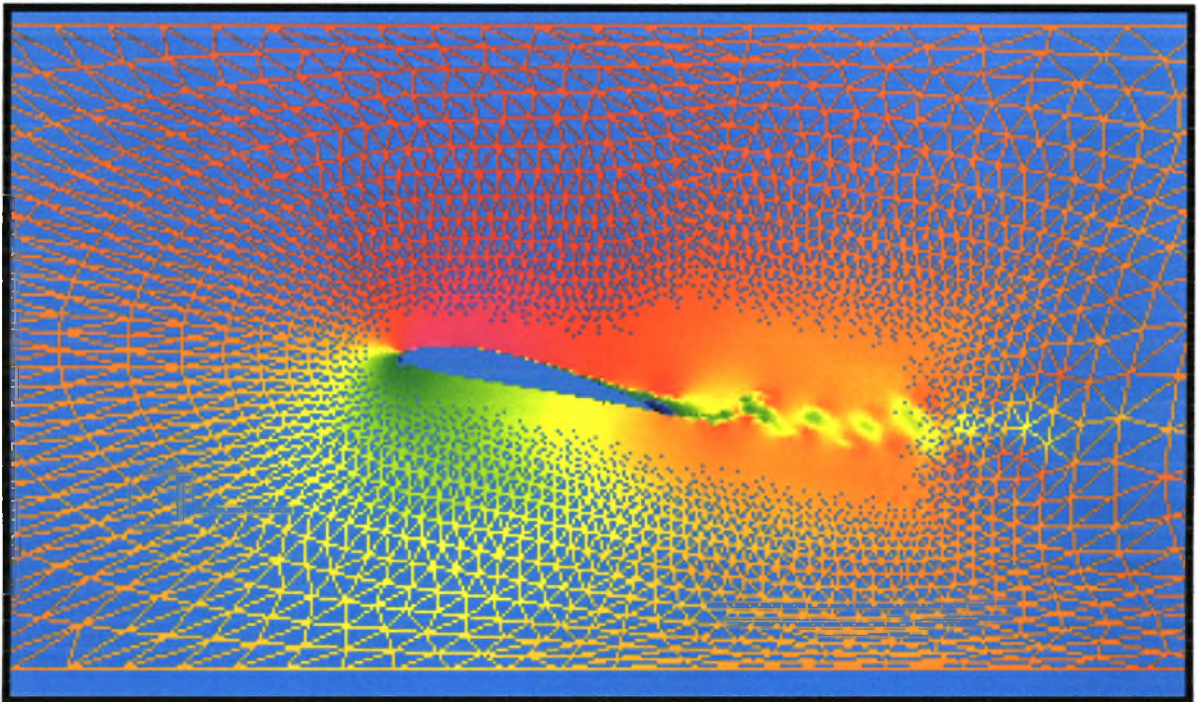


# Διπλωματική εργασία .

**Θέμα :** Επίδραση της τύρβης στη φόρτιση και ταλαντώσεις διδιάστατης ελαστικής πτέρυγας.



**Σκούρος Παναγιώτης**

Προπτυχιακός φοιτητής τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας (Πολ/κή Σχολή , Παν.Θεσσαλίας).



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5292/1  
Ημερ. Εισ.: 02-05-2007  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2007  
ΣΚΟ

# Περιεχόμενα

## Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή .....	1.
----------------	----

## Κεφάλαιο 2

### Βιβλιογραφική ανασκόπηση.

2.1 Σκοπός της διπλωματικής.....	2.
2.2 Ανασκόπηση .....	2.
2.3 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	3.
2.3.1 Πτέρυγες ,γενικά χαρακτηριστικά.....	3.
2.3.2 Άνωση σε πτέρυγες .....	3-5.
2.3.3 Κλίση του συντελεστή άνωσης .....	5.
2.3.4 Τυρβώδης ροή .....	6.
2.3.5 Ομοιογενής και ισότροπη τύρβη .....	6.
2.3.6 Φασματική πυκνότητα συχνοτήτων – φάσμα Kolmogorow.....	6-7.

## Κεφάλαιο 3

### Πειραματική μεθοδολογία.

3.1. Θερμο-ανεμομετρία.....	8.
3.2. Δυναμομετρία.....	9.
i) Μετρήσεις μέσου συντελεστή άνωσης.....	9-10.
i i) Προσδιορισμός της ταλάντωσης των ακροπτερυγίων.....	10-11.
3.3. Οπτική μέθοδος .....	11.

## Κεφάλαιο 4

### Περιγραφή πειραματικής διάταξης.

4.1. Αεροδυναμική σήραγγα.....	12.
4.2. Πειραματικά μοντέλα.....	13.
i) Μη ελαστική (ξύλινη) πτέρυγα.....	13-14.
i i) Ελαστική πτέρυγα.....	14-20.

* Εύρεση μέτρου ελαστικότητας ελαστικής πτέρυγας.....	20-22.
4.3. Μετρητικά όργανα.....	22.
4.3.1. Ανεμόμετρο θερμού νήματος.....	22-24.
Βαθμονόμηση ανεμομέτρου.....	24.
4.3.2. Παλμογράφος.....	24-25.
4.3.3 Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο.....	25-27.
4.3.4. Ζυγαριά ελατηρίου.....	27.
4.3.5. Ψηφιακή βιντεοκάμερα.....	27.
4.4. Δημιουργία ισότροπης τύρβης.....	28-29.
4.5. Λογισμικό επεξεργασίας των μετρήσεων.....	29-30.

## Κεφάλαιο 5

### Μετρήσεις.

5.1. Περιγραφή του πεδίου ροής.....	31.
5.1.1. Βαθμονόμηση της αεροδυναμικής σήραγγας σε στρωτή και τυρβώδη ροή.....	31-34.
5.1.2. Φάσματα ισχύος συχνοτήτων της ταχύτητας σε στρωτή και τυρβώδη ροή.....	35.
i) Στρωτή ροή.....	35-39.
i i) Τυρβώδης ροή.....	40-44.
Σχόλια.....	44.
5.1.3. Κλίμακες τύρβης-χρόνου.....	45.
5.2. Μετρήσεις δυνάμεων , πειραματικές τιμές μέσου συντελεστή άνωσης σε στρωτή και τυρβώδη ροή .....	46.
5.2.1. Ελαστική πτέρυγα.....	46-47.
Σχόλια.....	47.
5.2.2. Μη ελαστική πτέρυγα.....	48-49.
Σχόλια.....	49.
5.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων οπτικοποίησης.....	50.
5.3.1. Φάσματα ισχύος της ταλάντωσης των ακροπτερυγίων στην ελαστική πτέρυγα .....	50-55.
Σχόλια.....	55.
5.3.2. Μετατοπίσεις στον κατακόρυφο άξονα.....	56-57.
Σχόλια.....	58.
5.4. Πειραματική μέτρηση της ταλάντωσης των ακροπτερυγίων στην ελαστική πτέρυγα .....	59.

<b>5.4.1. Αριθμητική ολοκλήρωση στιγμιαίων επιταχύνσεων.....</b>	<b>59-60.</b>
<b>A) Στρωτή ροή .....</b>	<b>60-62.</b>
<b>Σχόλια.....</b>	<b>62.</b>
<b>B) Τυρβώδης ροή .....</b>	<b>63-66.</b>
<b>5.4.2 Στατιστική ανάλυση ενδείξεων των επιταχυνσιόμετρων.....</b>	<b>66-68.</b>
<b>Σχόλια.....</b>	<b>68.</b>
<b>5.4.3. Μεταβατικό φαινόμενο .....</b>	<b>68-72.</b>

## **Κεφάλαιο 6.**

### **Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με τη θεωρία.**

<b>6.1. Σύγκριση θεωρητικού και πειραματικά μετρημένου μέσου συντελεστή</b>	
<b>άνωσης στις δύο πτέρυγες.....</b>	<b>73.</b>
<b>A) Ελαστική πτέρυγα .....</b>	<b>73-77 .</b>
<b>Σχόλια.....</b>	<b>77.</b>
<b>B) Μη ελαστική πτέρυγα.....</b>	<b>78-82.</b>
<b>Σχόλια.....</b>	<b>82.</b>

## **Κεφάλαιο 7.**

<b>Συμπεράσματα – παρατηρήσεις.....</b>	<b>83-85.</b>
---	---------------

## Πίνακας συμβόλων.

<b><math>\alpha</math></b>	γωνία πρόσπτωσης ( $^{\circ}$ ).
<b><math>A</math></b>	κάθετη επιφάνεια ( $m^2$ ) .
<b><math>AR</math></b>	λόγος επιμήκους ή διάταμα .
<b><math>a</math></b>	επιτάχυνση ( $m/s^2$ ) .
<b><math>\beta</math></b>	γωνία βοηθητικού πτερυγίου ( $^{\circ}$ ).
<b><math>b</math></b>	εκπέτασμα πτέρυγας ( $m$ ).
<b><math>c</math></b>	μήκος χορδής ( $m$ ).
<b><math>C_L</math></b>	συντελεστής άνωσης .
<b><math>D</math></b>	οπισθέλκουσα ή αντίσταση ( $Nt$ ) .
<b><math>E</math></b>	μέτρο ελαστικότητας ( $Nt / m^2$ ) .
<b><math>f</math></b>	συχνότητα ( $Hz$ ) .
<b><math>I</math></b>	ροπή αδράνειας επιφάνειας ( $m^4$ ).
<b><math>k</math></b>	κυματαριθμός.
<b><math>\Lambda</math></b>	γωνία οπισθοκλίσεως ( $^{\circ}$ ).
<b><math>L</math></b>	άνωση ( $Nt$ ) .
<b><math>l</math></b>	κλίμακα τύρβης ( $m$ ).
<b><math>L_x</math></b>	κλίμακα τύρβης ( $m$ ).
<b><math>\mu</math></b>	συντελεστής κλίσης άνωσης.
<b><math>P</math></b>	δύναμη ( $Nt$ ) .
<b><math>R</math></b>	συντελεστής συσχέτισης.
<b><math>\rho</math></b>	πυκνότητα ( $kg/m^3$ ).
<b><math>Re</math></b>	αριθμός Reynolds.
<b><math>S</math></b>	κάθετη επιφάνεια ( $m^2$ ) .
<b><math>S_u</math></b>	φάσμα ταχυτήτων ( $(m/s)^2/ Hz$ ) .
<b><math>SR</math></b>	συχνότητα δειγματοληψίας ( $s^{-1}$ ) .
<b><math>T_x</math></b>	κλίμακα χρόνου ( $s$ ).
<b><math>u_{rms}</math></b>	μέση τετραγωνική απόκλιση ταχυτήτων.
<b><math>U_m</math></b>	μέση ταχύτητα ( $m/s$ ) .
<b><math>U_{\infty}</math></b>	μέση ταχύτητα ( $m/s$ ) .
<b><math>u_l</math></b>	χαρακτηριστική ταχύτητα ( $m/s$ ) .



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ .

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσουμε πειραματικά πώς επηρεάζεται ο μέσος συντελεστής άνωσης μιας πτέρυγας από το είδος του ροικού πεδίου καθώς και από την ελαστικότητα του υλικού της πτέρυγας.

Αναλυτικότερα , το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική μελέτη δύο πτερύγων τυποποιημένης αεροτομής ,μιας ελαστικής και μιας μη ελαστικής. Στις δύο αυτές πτέρυγες προσδιορίζουμε πειραματικά τον μέσο συντελεστή άνωσης  $C_L$  για στρωτή και για τυρβώδη ροή σε διαφορετικές γωνίες προσβολής και αριθμούς Reynolds , αναλύουμε τα αποτελέσματα και τα συγκρίνουμε με τη θεωρία. Επιπλέον στην ελαστική πτέρυγα μετράμε τις μετατοπίσεις των ακροπτερυγίων της και συγκρίνουμε αυτήν την ταλάντωση που υφίστανται με τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής στην αεροσήραγγα.

Έτσι , έχει μεγάλο ενδιαφέρον να δούμε και στην πράξη πώς λειτουργούν οι πτέρυγες τις οποίες (παραπλήσιου τύπου) βλέπουμε στην καθημερινή μας ζωή σε αεροπλάνα , ελικόπτερα κ.ά. , πώς παράγεται η ανωστική δύναμη ,από τι επηρεάζεται και πώς μπορούμε να τη μεγιστοποιήσουμε . Επίσης μπορούμε να πάρουμε μια ιδέα για τα φορτία που υφίσταται η ίδια η πτέρυγα (στατικά και δυναμικά) ανάλογα με το είδος της ροής (τυρβώδης ή στρωτή) και τον προσανατολισμό της σ'αυτή.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω οι πτέρυγες έχουν ευρεία χρήση και εφαρμογή στην αεροναυπηγική. Η ανωστική δύναμη που παράγουν χρησιμεύει στα αεροπλάνα και τα ελικόπτερα και μπορεί να ανέλθει έως και τους 500 τόνους σε κάποιους τύπους επιβατηγών αεροπλάνων (Boeing 747).

Σήμερα , που ζούμε την εποχή της ταχύτητας και των μεταφορών είναι αναγκαία όσο ποτέ άλλοτε η διεξοδική μελέτη των πτερύγων ως επέκταση της εξέλιξης της αεροναυπηγικής και η βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες ροής (έντονης τύρβης ως επί το πλείστον). Έτσι όπως είναι αναμενόμενο η έρευνα σε βιομηχανικό και εργαστηριακό επίπεδο αναπτύσσεται ραγδαία .

Με μια απλή 'πλοήγηση' στο διαδίκτυο βλέπουμε το πλήθος των ερευνητικών προγραμμάτων που εξελίσσονται παγκοσμίως γύρω από την αεροναυπηγική και συγκεκριμένα τις πτέρυγες από οργανισμούς (NASA κλπ) και ερευνητικά εργαστήρια (πανεπιστήμια κλπ).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .

### Βιβλιογραφική ανασκόπηση.

#### 2.1. Σκοπός της διπλωματικής.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι , μέσα από μια σειρά πειραμάτων στην αεροσήραγγα , να προσδιορίσουμε πειραματικά με ποιον τρόπο το είδος του ροικού πεδίου και το υλικό των πτερύγων επηρεάζουν τον μέσο συντελεστή άνωσης , δηλαδή την ανωστική δύναμη την οποία δέχονται, σε διάφορες γωνίες προσβολής.

#### 2.2. Ανασκόπηση.

Η θεωρία για αεροτομές σε διδιάστατη μη μόνιμη ροή αναπτύχθηκε από το **Wagner** και επεκτάθηκε σε προβλήματα που συμπεριλάμβαναν ελαστικές αεροτομές από τους **Theodorsen** και **Kussner**. Επίσης με αυτό το θέμα ασχολήθηκε και ο **Sears** (1941) , ο οποίος πρώτος παρουσίασε μια θεωρία για την επίπτωση ενός ημιτονοειδούς ροικού πεδίου σε μια λεπτή αεροτομή. Η ίδια θεωρία γενικεύτηκε από τον **Kemp** (1952) για να συμπεριλάβει ροικά πεδία διαφορετικών ταχυτήτων. Σ'αυτή τη θεωρία η επίπτωση του είδους του ροικού πεδίου στην άνοση γραμμικοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = \frac{U_{RMS}}{U_{\infty}}$$

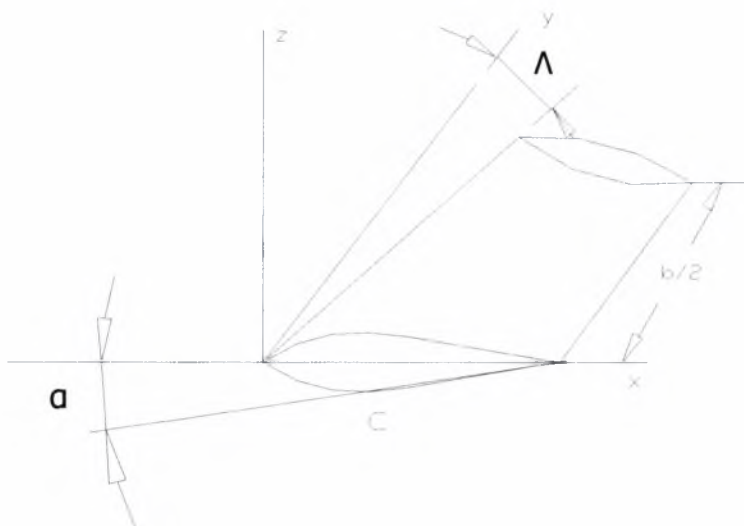
Το 1970 ο **Graham** ανέπτυξε τη θεωρία επιφανειακής άνωσης για να υπολογίσει την επίπτωση στην άνοση ενός ημιτονοειδούς τριδιάστατου ροικού πεδίου. Η ίδια θεωρία χρησιμοποιήθηκε το 1973 από τους **Jackson** , **Graham** και **Mauil** για να συγκρίνουν την θεωρητικά αναμενόμενη ανταπόκριση μιας λεπτής αεροτομής σε τυρβώδη ροή με πειραματικές μετρήσεις που έκαναν σε αεροσήραγγα σε ισότροπη και ομογενή τύρβη. Το 1976 οι **Goldstein** και **Atassi** γενίκευσαν τη διδιάστατη θεωρία για να συμπεριλάβουν την απίπτωση της γωνίας προσπτώσεως, της καμπύλης και του πάχους της αεροτομής στην άνοση. Την ίδια χρονιά ο **McKeough** μετά από λεπτομερή μελέτη έδειξε ότι η επίπτωση στην άνοση που δέχεται μια λεπτή αεροτομή σε τυρβώδη ροή είναι ανάλογη του  $\varepsilon^2 * \alpha^2$ .



## 2.3. Θεωρητικό υπόβαθρο.

### 2.3.1. Πτέρυγες , γενικά χαρακτηριστικά:

Στο παρακάτω σχήμα αναφέρονται τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερύγων.



Σχήμα 2.3.1.1.

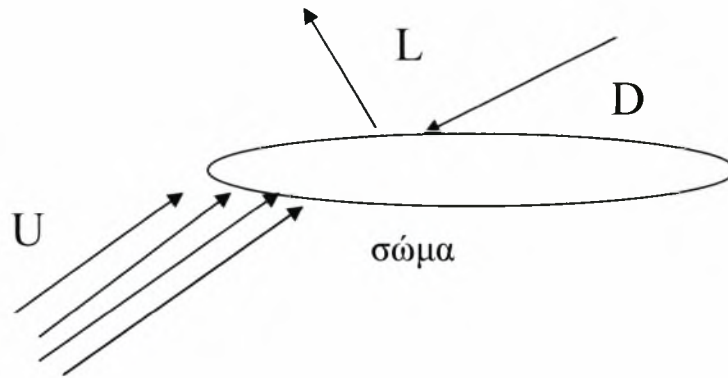
όπου:  $c$ =μήκος χορδής ,  $b$ =εύρος ,  $\alpha$ =γωνία πρόσπτωσης ,  $\Lambda$ =γωνία οπισθοκλίσεως,  $A$ =επιφάνεια προβολής στο  $x,y$  επίπεδο.

Ένα σημαντικό γεωμετρικό χαρακτηριστικό για τις πτέρυγες είναι ο λόγος επιμήκους ή διάταμα , που εκφράζεται  $AR=b^2/A$ . Για τις ορθογωνικές πτέρυγες ισχύει  $AR= b/c$  .

(Σημειώσεις συμπίεστης και ασυμπίεστης αεροδυναμικής , Ερ. Σταπουντζής.)

### 2.3.2. Άνωση σε πτέρυγες .

Κατά τη σχετική κίνηση ενός σώματος σε ένα ρευστό , ασκούνται στο σώμα δύο δυνάμεις κάθετες μεταξύ τους , η άνωση  $L$  (Lift) και η τριβή  $D$  (Drag),( σχήμα 2.3.2.1)



**Σχήμα 2.3.2.1**

Ανάλογα με το σχήμα του κάθε σώματος εξαρτάται και η σχέση **L/D**. Οι πτέρυγες σαν αεροδυναμικά σώματα είναι έτσι σχεδιασμένα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της ανωστικής δύναμης εις βάρος της αντίστασης κατά τη σχετική κίνησή τους σε ρευστό (κυρίως αέρα).

Το μέτρο της ανωστικής δύναμης δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$L = \frac{1}{2} * \rho * A * C_L * U^2$$

όπου :

$\rho$  = πυκνότητα του ρευστού

$A$  = επιφάνεια προσβολής (για πτέρυγες  $A = \text{χορδή} * \text{εκπέτασμα}$ .)

$C_L$  = συντελεστής άνωσης

$U$  = σχετική ταχύτητα ρευστού – σώματος.

Ο συντελεστής άνωσης είναι ένας αδιάστατος αριθμός που είναι συνάρτηση της γωνίας προσβολής  $\alpha$  , του επίσης αδιάστατου αριθμού **Reynolds** (  $Re = U * c / \nu$ ), της **τραχύτητας** της επιφάνειας , του **είδους του πεδίου ροής** και της **γεωμετρίας** της πτέρυγας.

$$C_L = \frac{2 * L}{\rho * A * U^2}$$

Γενικά , η αύξηση της γωνίας προσβολής  $\alpha$  αυξάνει την συνισταμένη άνωση με άνω όριο την αποκόλληση της ροής (ιδιαίτερα στο πάνω οριακό στρώμα) η οποία επιφέρει διαταραχές στην τιμή του συντελεστή άνωσης (απότομη μείωση).

Το πάχος της αεροτομής της πτέρυγας έχει βρεθεί πειραματικά ότι αυξάνει ανάλογα τον  $C_L$  (δηλαδή είναι υψηλότερος στις ‘παχύτερες’ αεροτομές) πάλι μέχρι ενός ανώτατου ορίου πέρα από το οποίο δρα αρνητικά μειώνοντάς τον απότομα. Επίσης μεγάλο ρόλο παίζει και η γωνία της ακμής φυγής της αεροτομής καθώς η αύξησή της επιφέρει μείωση της κλίσης του συντελεστή άνωσης  $dC_L / d\alpha$ .

Τέλος μεγάλη επιρροή έχει ο αδιάστατος αριθμός **Reynolds** καθώς η αύξησή του γενικά καθυστερεί ή και αναβάλλει την αποκόλληση των οριακών στρωμάτων, τα κάνει πιο λεπτά, ευνοεί τη μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη και συνεπώς οδηγεί σε υψηλότερες τιμές  $C_L$ . Και η εισαγωγή τύρβης στην παράλληλη ροή επιφέρει αποτελέσματα που ισοδυναμούν με αύξηση του **Re**.

Το κύριο μέρος της ανωστικής δύναμης οφείλεται στη διαφορά πίεσης που παρατηρείται στο επάνω και κάτω άκρο των πτερύγων. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην κατάλληλη διαμόρφωσή τους και τον προσανατολισμό τους στη ροή. (Αεροδυναμική του συμπιεστού ρευστού, Σ. Τσαγγάρης).

### 2.3.3. Κλίση του συντελεστή άνωσης.

Βάσει της θεωρίας της ανωστικής γραμμής έχει προκύψει για τις ορθογωνικές πτέρυγες σε ατριβές ρευστό η παρακάτω σχέση για την κλίση του συντελεστή άνωσης ως προς τη γωνία προσβολής  $\alpha$ , συναρτήσει της κλίσης του συντελεστή άνωσης της αεροτομής:

$$\left( \frac{dC_L}{d\alpha} \right)_{\text{πτερ}} = \mu \times \frac{AR}{AR + 2}$$

όπου,

$$\mu = \left( \frac{dC_L}{d\alpha} \right)_{\text{αεροτ}}$$

Όμως, κατά την τοποθέτηση της πτέρυγας από ατριβές σε ρευστό με τριβή εμφανίζονται τα οριακά στρώματα είτε τυρβώδη είτε στρωτά τα οποία εμφανίζουν την πτέρυγα πιο ογκώδη. Αυτό έχει ως άμεσο αντίκτυπο τη μείωση του συντελεστή άνωσης  $C_L$  σε σχέση με τη θεωρητική του τιμή για ατριβές ρευστό και κατά συνέπεια την αντίστοιχη μείωση της κλίσης του  $dC_L / d\alpha$ . Αυτό θα φανεί και πειραματικά.

(Σημειώσεις συμπιεστής και ασυμπίεστης αεροδυναμικής, Ερ. Σταπουντζής.)

#### 2.3.4.Τυρβώδης ροή.

Η τυρβώδης ροή είναι ο πιο πολύπλοκος τύπος ροής των ρευστών και ο πιο κοινός. Η ροή του ατμοσφαιρικού αέρα είναι σχεδόν πάντα τυρβώδης κοντά στην επιφάνεια της γης. Οι τυρβώδεις ροές είναι ακόμη στα περισσότερα σημεία ανεξιχνίαστες ως προς τη φυσική τους αλλά και πολύπλοκες στη μελέτη και τις εφαρμογές τους. Ακριβής και λεπτομερειακός ορισμός της τύρβης δεν υπάρχει. Οι ιδιότητές της είναι αυτές που την περιγράφουν.

Για ένα Νευτώνιο ρευστό η τυρβώδης ροή αποτελεί θεωρητικά τη γενική λύση των εξισώσεων **Navier – Stokes**.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = -\nabla P + \rho \nu \nabla^2 \mathbf{v}$$

Από τη μη γραμμική μορφή των εξισώσεων αυτών προκύπτει ότι η λύση της είναι εξαιρετικά δύσκολη. Απ'ευθείας λύση αυτών των εξισώσεων είναι πρακτικά αδύνατη με τις σημερινές υπολογιστικές δυνατότητες.

Λόγω αυτού του μη γραμμικού και τυχαίου χαρακτήρα τους οι τυρβώδεις ροές περιγράφονται καλύτερα από διάφορες στατιστικά μέσες συναρτήσεις. Αυτό όμως συνεπάγεται εισαγωγή περισσότερων αγνώστων συναρτήσεων. (Μηχανική των ρευστών, Σ. Τσαγγάρης).

#### 2.3.5 Ομοιογενής και ισότροπη τύρβη.

Ομοιογενής και ισότροπη τύρβη ορίζεται όταν οι στατιστικά μέσες ιδιότητες του πεδίου της ταχύτητας (μέση τυπική απόκλιση, μέση ταχύτητα κλπ) είναι ίδιες προς όλες τις κατευθύνσεις στο χώρο. Αυτό το είδος τύρβης παράγεται εργαστηριακά με τη βοήθεια κατάλληλα διαστασιολογημένου πλέγματος σε αεροσήραγγα ή υδροσήραγγα. (Μηχανική των ρευστών, Σ. Τσαγγάρης).

#### 2.3.6 Φασματική πυκνότητα συχνοτήτων – σπέκτρο Kolmogorow.

Το φάσμα Kolmogorow βασίζεται σε ένα στατιστικό μοντέλο περιγραφής της τυρβώδους ροής και χρησιμοποιείται ικανοποιητικά για την περιγραφή της κατανομής της ενέργειας της τύρβης. Προκύπτει από το μετασχηματισμό Fourier του κυμαινόμενου μέρους του πεδίου των ταχυτήτων.

Το στατιστικό μοντέλο περιγραφής της τυρβώδους ροής εξιδανικεύει το πεδίο ροής κάνοντας την παραδοχή ότι αποτελείται από ‘στροβιλισμούς’ οι οποίοι ύστερα από μια περίοδο διασπώνται κατά το ‘ήμισυ’. Αυτό το μοντέλο περιγράφει σε ικανοποιητικό βαθμό την ισότροπη και ομογενή τύρβη και έχει ευρεία εφαρμογή σε ερευνητικά εργαστήρια.

Ο μαθηματικός τύπος που προκύπτει είναι:

$$u_k(k) = q^{\frac{2}{3}} * k^{-\frac{5}{3}}$$

με:

$$q = \frac{u_1^3}{1}$$

και

$$\frac{2\pi}{1} \leq k \leq \frac{2\pi}{1} * \left( \frac{u_1 * 1}{v} \right)^{\frac{3}{4}}$$

Ο εκθέτης  $-5/3$  είναι πολύ ακριβής για την ισότροπη και ομογενή τύρβη. (American institute of aerospace)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

### Πειραματική μεθοδολογία.

Για να προσδιορίσουμε την επίδραση του είδους του ροικού πεδίου και του υλικού των πτερύγων στο μέσο συντελεστή άνωσης , που είναι και ο σκοπός μας , ήταν αναγκαίο να αναπτυχθεί η κατάλληλη πειραματική κυρίως μεθοδολογία έτσι ώστε : να παίρνουμε μετρήσεις μέσης ανωστικής δύναμης στην πτέρυγα , να προσδιορίζουμε το πεδίο ροής (πεδίο ταχυτήτων, χαρακτηριστικά τύρβης κ.λ.π) στο σημείο τοποθέτησης της πτέρυγας, να μετράμε τις στιγμιαίες τιμές επιταχύνσεων στα ακροπτερύγια , να βιντεοσκοπούμε την ταλάντωση των ακροπτερυγίων και να αλλάζουμε τη γωνία προσβολής. Οι πειραματικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι : η **θερμο-ανεμομετρία** , η **δυναμομετρία** και η **οπτική μέθοδος**.

#### 1. Θερμο-ανεμομετρία.

Για την περιγραφή του πεδίου ροής , δηλαδή για τη μέτρηση της ταχύτητας ροής ,της έντασης και των υπολοίπων χαρακτηριστικών της τύρβης (φάσματα ισχύος ταχύτητας ,κλίμακες χρόνου κλπ) , χρησιμοποιήθηκε ένα κατάλληλα βαθμονομημένο ανεμόμετρο θερμού νήματος μεγάλης ακρίβειας (εικόνα 3.1.1.) το οποίο μέσω συνδεσμολογίας με λογισμικό μας δίνει τη δυνατότητα λήψης πολύ μεγάλου αριθμού μετρήσεων στη μονάδα του χρόνου. Η περιγραφή του πεδίου ροής έγινε σε ένα συγκεκριμένο σημείο πριν την ακμή προσβολής των πτερύγων – μοντέλων , με την παραδοχή διδιάστατης ροής.



**Εικόνα 3.1.1.**

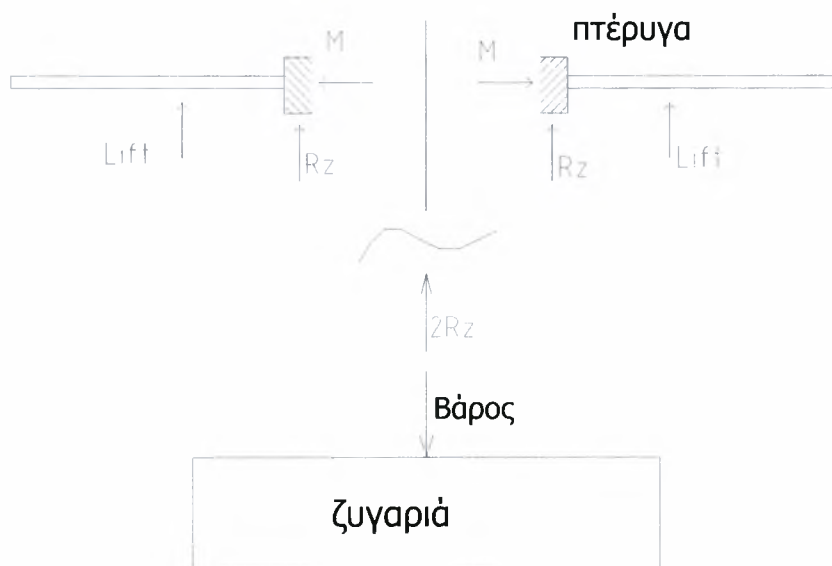
## 2. Δυναμομετρία.

Η δυναμομετρία χρησιμοποιήθηκε για να μετρήσουμε αφενός τη μέση ανωστική δύναμη στην πτέρυγα και αφετέρου τις επιταχύνσεις στα ακροπερύγια.

### i) Μετρήσεις μέσου συντελεστή άνωσης.

Για τη μέτρηση του μέσου συντελεστή άνωσης χρησιμοποιήθηκε μια ζυγαριά ελατηρίου ικανοποιητικής για τα πειράματά μας ακρίβειας. Με αυτή τη ζυγαριά και μέσω κατάλληλης διάταξης μετρούσαμε μέσες τιμές άνωσης και κατ'έκταση μέσου συντελεστή άνωσης. Η ιδέα έχει ως εξής:

Η πτέρυγα είναι πακτωμένη στο μέσο της στον σπειροτομημένο άξονα. Η κύλιση στο κάτω άκρο του άξονα εφάπτεται σε οριζόντια πλάκα η οποία είναι προσαρμοσμένη με κοχλίες πάνω στη ζυγαριά, ώστε να παραλαμβάνει μόνο κατακόρυφες συνιστώσες δυνάμεων δηλαδή κατά την  $y$  διεύθυνση και παράλληλες του άξονα. Έτσι η συνισταμένη της άνωσης που ασκείται στην πτέρυγα μεταβιβάζεται στη ζυγαριά, απ'όπου έπειτα παίρνουμε τις μετρήσεις, βάσει του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα 3.2.1.

Όπου :

**Βάρος :** το συνολικό βάρος της κατασκευής .

**Lift :** η μέση άνωση στο κάθε μισό της πτέρυγας.

**Ry :** η μέση αντίδραση στην πάκτωση.

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις ισορροπίας (για τις μέσες τιμές των φορτίων) για το παραπάνω διάγραμμα ελεύθερου σώματος ( και θεωρώντας την κατακόρυφη μετατόπιση  $u$  του σημείου εφαρμογής της άνωσης στην ελαστική πτέρυγα πολύ μικρότερη του μήκους  $L = (b/2)$  , ( $u \ll L$ )), τότε καταλήγουμε :

$$\Sigma F_y = 0 \rightarrow 2 * R_y + 2 * Lift = 0$$

Η μέση ένδειξη της ζυγαριάς είναι :  $\text{Ένδειξη} = \text{Βάρος} - \Sigma Lift \Rightarrow \Sigma Lift = \text{Ένδειξη} - \text{Βάρος}$

Αυτό σημαίνει πως η ένδειξη της ζυγαριάς θα είναι ίση με το βάρος της όλης κατασκευής μείον την συνολική μέση άνωση που ασκείται στην πτέρυγα. Το βάρος της κατασκευής θα αναφέρεται στις μετρήσεις ως η ένδειξη της ζυγαριάς για ταχύτητα αέρα στην αεροσήραγγα ίση με μηδέν.

## ii) Προσδιορισμός της ταλάντωσης της πτέρυγας.

Για τον πειραματικό προσδιορισμό των ταλαντώσεων της πτέρυγας χρησιμοποιήθηκαν δύο επιταχυνσιόμετρα (τα οποία περιγράφονται πιο κάτω) τα οποία στερεώθηκαν στα δύο ακροπτέρυγα σε απόσταση  $c/4$  από την ακμή προσβολής όπου περίπου εντοπίζεται το κέντρο ροπής της πτέρυγας (έτσι ώστε να μετρήσουμε όσο γίνεται ταλάντωση που οφείλεται καθαρά στο πεδίο ροής και όχι σε αντίρροπες φορτίσεις) (εικόνα 3.2.1).



**Εικόνα 3.2.1.**

Αυτά τα επιταχυνσιόμετρα μας δίνουν με μεγάλη ακρίβεια (0.05 g) και ευαισθησία σε συχνότητες δειγματοληψίας από 0.8 έως και 5000 Hz επιταχύνσεις . Από αυτές αριθμητικά βρίσκουμε στιγμιαίες ταχύτητες, δυνάμεις , μετατοπίσεις και στατιστικά μεγέθη όπως φάσματα ισχύος , μέσες τιμές και μέσες τυπικές αποκλίσεις τα οποία χρησιμεύουν στη σύγκριση του πεδίου ροής και της ταλάντωσης των ακροπερυγίων της ελαστικής πτέρυγας.

### **3.3 Οπτική μέθοδος.**

Για τον προσδιορισμό της ταλάντωσης οπτικά χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή βιντεοκάμερα ταχύτητας λήψης φωτογραφιών 25 φωτ./s πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει ένας περιορισμός ως προς το εύρος των μετρήσιμων συχνοτήτων με αυτή τη μέθοδο το οποίο είναι από 0 έως 12.5 Hz (δηλαδή έως το ήμισυ της συχνότητας δειγματοληψίας).

Ύστερα γίνεται ειδική επεξεργασία της εικόνας με ειδικά προγράμματα Matlab τα οποία παράγουν φάσματα ισχύος (σπέκτρα) στις συχνότητες 0 έως 12.5 Hz και μετατόπιση κατά τον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα .

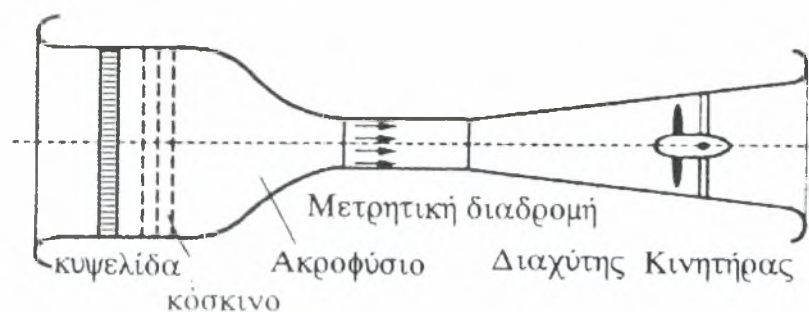
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

### Περιγραφή πειραματική διάταξης.

#### 4.1 Αεροδυναμική σήραγγα.

Αεροσήραγγες είναι οι σήραγγες στις οποίες κυκλοφορεί με ελεγχόμενο τρόπο αέριο, ώστε βάσει της ομοιότητας να δοκιμαστούν αεροδυναμικές κατασκευές-μοντέλα. Η αεροσήραγγα που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι μια σήραγγα ανοιχτού κυκλώματος τύπου **Eiffel** (σχήμα 4.1.1.). Η ονομαστική ισχύς του φυσητήρα είναι **7.5 kW** και οι διαστάσεις της μετρητικής διαδρομής είναι μήκος=**3m**, διατομή=**(0.72m)x(0.52m)**. Η ονομαστική μέγιστη ταχύτητα αέρα είναι **30m/s**. Η επιλογή των ταχυτήτων γίνεται ηλεκτρονικά (μέσω inverter) αυξομειώνοντας τη συχνότητα  $f$  (Hz) του ρεύματος τροφοδοσίας του φυσητήρα. Έτσι η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του φυσητήρα θα είναι  $S=120f/P$  (όπου  $P$  το πλήθος των πόλων στο κάθε ένα από τα μονοφασικά τυλίγματα στον ηλεκτρομαγνητικό στάτορα του κινητήρα του φυσητήρα), δηλαδή ανάλογη της  $f$ .

ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ (ΤΥΠΟΥ EIFFEL)



Σχήμα 4.1.1.

Στην εσωτερική επιφάνεια της μετρητικής διαδρομής της αεροσήραγγας εμφανίζεται το στρωτό και το τυρβώδες οριακό στρώμα ανάλογα με το είδος της ροής εντός αυτής. Έτσι όπως αναμένεται το πεδίο των ταχυτήτων εντός της μετρητικής διαδρομής διαφέρει κατά τη διατομή της.



Για τη στρωτή ροή συγκεκριμένα ισχύει ο τύπος για τη ροή πάνω από επίπεδη πλάκα :

$$\delta = 5 * \sqrt{\frac{\nu * x}{U_{\infty}}}$$

Για τα δικά μας δεδομένα το οριακό στρώμα στα τοιχώματα της αεροσήραγγας είναι της τάξης του 1.5 cm. Έτσι δεν λαμβάνεται υπόψη στις μετρήσεις μας.

Για το τυρβώδες οριακό στρώμα ισχύει ο τύπος:

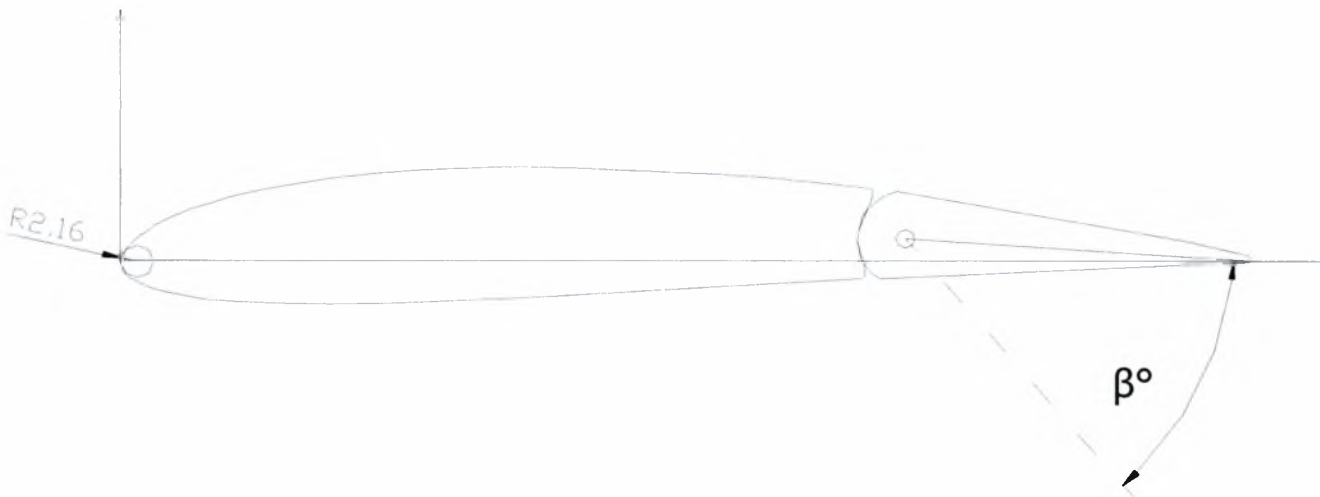
$$\delta = 0.37 * \left( \frac{\nu}{U_{\infty}} \right)^{\frac{1}{5}} * x^{\frac{4}{5}}$$

Για τα δικά μας δεδομένα το οριακό στρώμα στα τοιχώματα της αεροσήραγγας είναι της τάξης του 2.1 cm. Έτσι δεν λαμβάνεται υπόψη στις μετρήσεις μας.

## 4.2. Πειραματικά μοντέλα.

### i) Μη ελαστική (ξύλινη) πτέρυγα.

Η πρώτη πτέρυγα που μελετάται είναι μια ξύλινη πτέρυγα με κινητό βοηθητικό πτερύγιο (flap) . Η αεροτομή της πτέρυγας φαίνεται παρακάτω (σχήμα 4.2.1.).



**Σχήμα 4.2.1.**

Οι μετρήσεις της ανωστικής δύναμης έγιναν για  $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ$  για διάφορες γωνίες προσβολής.

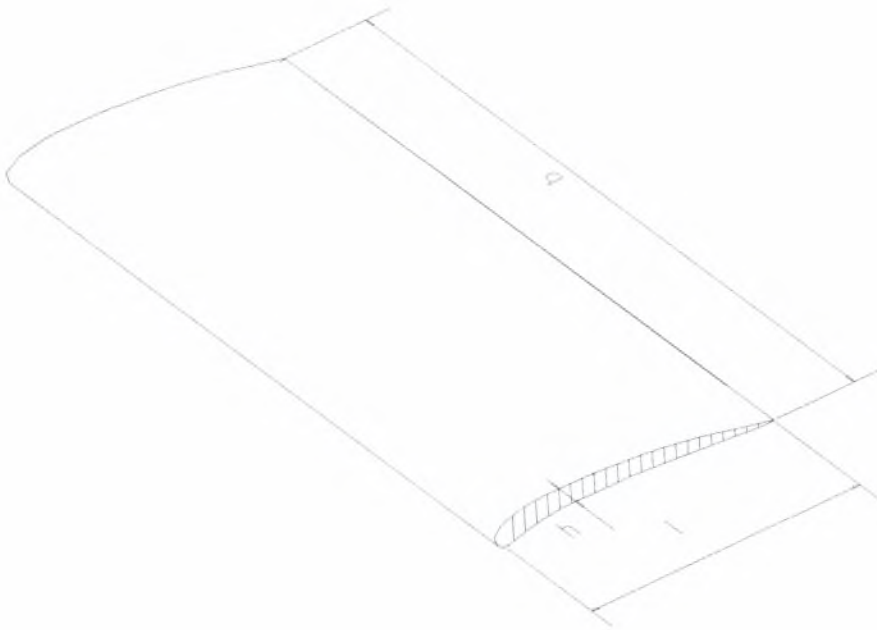
Οι κύριες διαστάσεις της ξύλινης πτέρυγας είναι, για  $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ$  αντίστοιχα :  $c$  (χορδή) = **150 , 148 , 144 mm**,  $b$  (εκπέτασμα) = **300 mm**,  $h$  (μέγιστο πάχος) = **17.5 mm**,  $\Lambda$  (γωνία οπισθοκλίσεως) =  $0^\circ$  (ορθογωνική πτέρυγα),  $AR$  (λόγος επιμήκους) =  $b^2 / c \cdot b =$  **2 , 2.02, 2.08** . Η συγκεκριμένη αεροτομή είναι τυποποιημένη από τη NASA , με κωδικό **NACA 3312**.

Όπως διαπιστώνουμε , το εκπέτασμα της συγκεκριμένης πτέρυγας είναι μικρότερο κατά πολύ από το πλάτος της μετρητικής διαδρομής της αεροσήραγγας. Έτσι , για να αποφύγουμε ροή αέρα στα ακροπτερύγια από το επάνω μέρος της πτέρυγας προς το κάτω ή αντίστροφα προσαρμόσαμε εκεί δύο ελάσματα μικρής μάζας και σχεδόν μηδενικής κάθετης στη ροή επιφάνειας έτσι ώστε να αποφευχθεί αυτή η ανακυκλοφορία .

## **ii) Ελαστική πτέρυγα.**

Η ελαστική πτέρυγα που χρησιμοποιήθηκε είναι από ένα είδος αφρώδους πολυουραιθάνης περιτυλιγμένης με πλαστικοποιημένο χαρτί ώστε να εξασφαλίζεται το λείο της επιφάνειάς της.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την πτέρυγα καθώς και τις κύριες διαστάσεις της:



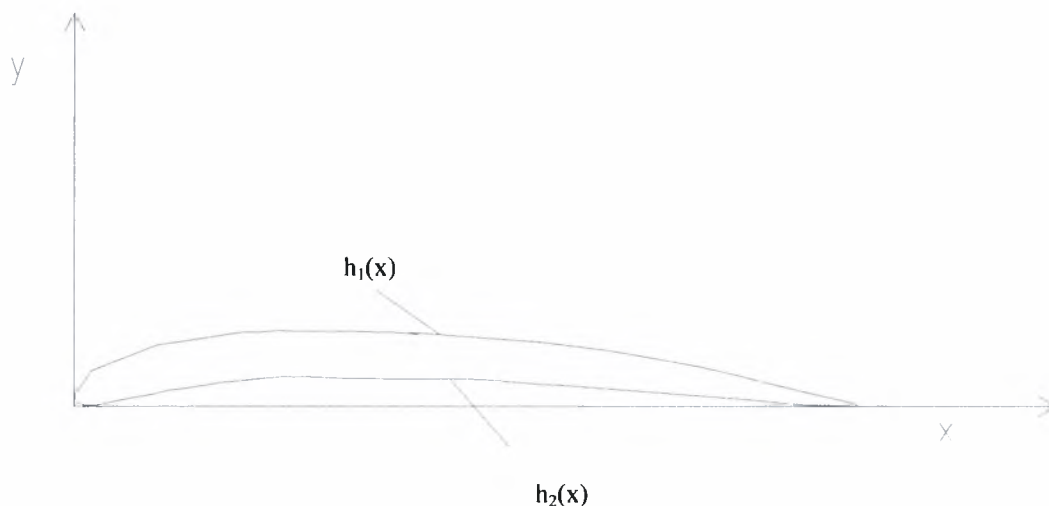
**Σχήμα 4.2.2.**

Κύριες διαστάσεις ελαστικής πτέρυγας :  $c$  (χορδή) = **105 mm**,  $b$  (εκπέτασμα) = **490 mm**,  $h$  (μέγιστο πάχος) = **5.1 mm**,  $\Lambda$  (γωνία οπισθοκλίσεως) = **0°** (ορθογωνική πτέρυγα),  $AR$  (λόγος επιμήκους) =  $b^2 / c \cdot b = 4.67$ .

Επειδή στην ελαστική πτέρυγα θα γίνει ανάλυση της στατικής και δυναμικής παραμόρφωσής της χρειάστηκε να βρεθούν κάποια χαρακτηριστικά της μεγέθη, όπως κέντρο βάρους, ροπές αδράνειας συναρτήσει της γωνίας προσβολής, μέτρο ελαστικότητας κ.ά.

Στις παρακάτω σελίδες παρατίθεται αυτή η ανάλυση.

Η αεροτομή της πτέρυγας έχει το παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 4.2.3.**

όπου :

**$h_1(x)$**  : η συνάρτηση παρεμβολής του επάνω ορίου της αεροτομής της πτέρυγας.

**$h_2(x)$**  : η συνάρτηση παρεμβολής του κάτω ορίου της αεροτομής της πτέρυγας.

Με τη βοήθεια του Excell βρίσκουμε ότι :

$$h_1(x) = A0 + A1 * x + A2 * x^2 + A3 * x^3 + A4 * x^4 + A5 * x^5 + A6 * x^6, \text{ όπου :}$$

$$A0 = 1.65886$$

$$A1 = 1.13994$$

$$A2 = -0.06174$$

$$A3 = 0.00169$$

$$A4 = -2.43749 * 10^{-5}$$

$$A5 = 1.74345 * 10^{-7}$$

$$A6 = -4.89633 * 10^{-10}$$

$$h_2(x) = B0 + B1 * x + B2 * x^2 + B3 * x^3 + B4 * x^4 + B5 * x^5 + B6 * x^6, \text{ όπου:}$$

$$B_0 = -0.00978$$

$$B_1 = 0.09851$$

$$B_2 = 0.01064$$

$$B_3 = -5.684 \cdot 10^{-4}$$

$$B_4 = 1.06813 \cdot 10^{-5}$$

$$B_5 = -9.00842 \cdot 10^{-8}$$

$$B_6 = 2.84885 \cdot 10^{-10}$$

Το εμβαδόν της διατομής της πτέρυγας (S) είναι :

$$S = \int_0^{105} (h_1(x) - h_2(x)) dx = 621.924 \text{ mm}^2$$

Αντίστοιχα , το κέντρο βάρους της διατομής είναι το σημείο K (x<sub>K</sub>, y<sub>K</sub>) , όπου :

$$x_K = \frac{\int x dA}{\int dA} = \frac{\int_0^{105} x \cdot (h_1(x) - h_2(x)) dx}{S} = 50.7214 \text{ mm}$$

$$y_K = \frac{\int y dA}{\int dA} = \frac{\int_0^{105} \frac{(h_1(x) + h_2(x))}{2} \cdot (h_1(x) - h_2(x)) dx}{S} = 5.526 \text{ mm}$$

Οι δευτεροβάθμιες ροπές αδράνειας της διατομής της πτέρυγας ως προς τους άξονες x,y είναι:

$$I_x = \int_A y^2 dA = \int_0^{105} \left( \frac{(h_1(x) + h_2(x))}{2} \right)^2 \cdot (h_1(x) - h_2(x)) dx = 74873 \text{ mm}^4$$

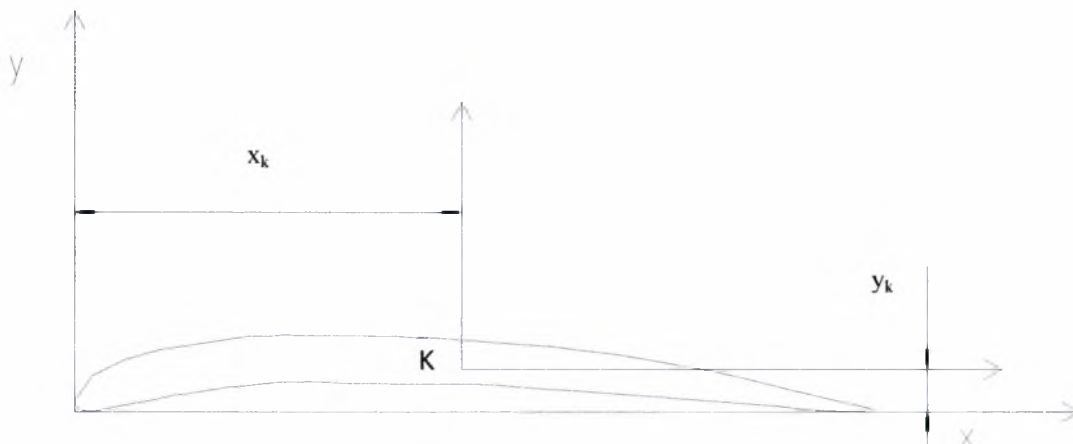


$$I_y = \int_A x^2 dA = \int_0^{105} x^2 * (h_1(x) - h_2(x)) dx = 2117510 \text{ mm}^4$$

$$I_{xy} =$$

$$\int_A x * y dA = \int_0^{105} x * \frac{(h_1(x) + h_2(x))}{2} * (h_1(x) - h_2(x)) dx = 162448 \text{ mm}^4$$

Ως προς τους κεντροβαρικούς άξονες , οι αντίστοιχες ροπές αδράνειας θα είναι:



Σχήμα 4.2.4.

$$I_{x_k, y_k} =$$

$$I_x - y_k^2 * S =$$

$$\int_A y^2 dA - y_k^2 * S = \int_0^{105} \left( \frac{(h_1(x) + h_2(x))}{2} \right)^2 * (h_1(x) - h_2(x)) dx - y_k^2 * S = 1427.91 \text{ mm}^4$$

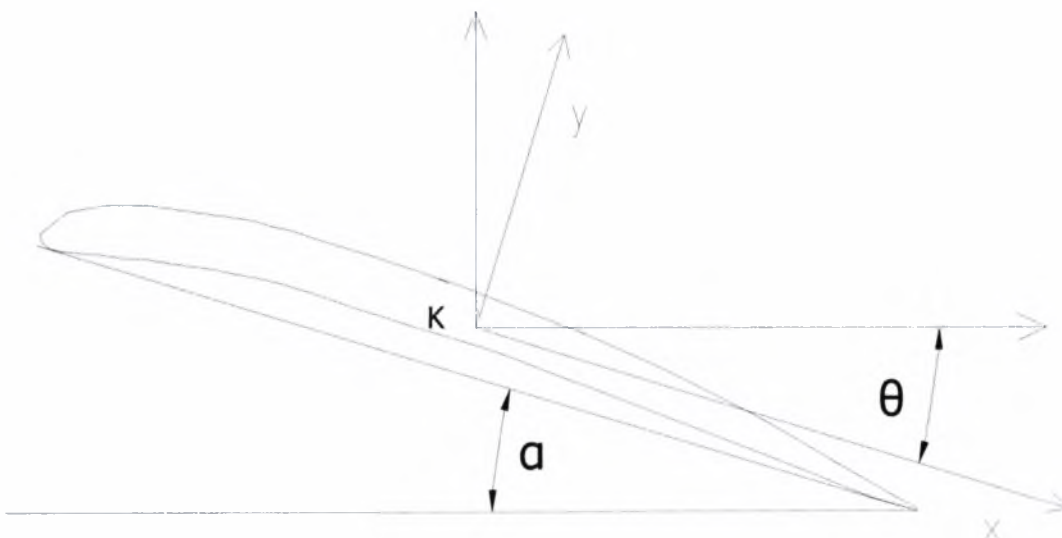
$$I_{y_{\kappa.\beta}} =$$

$$I_{y - x_{\kappa}}^2 * S = \int_A x^2 dA - x_{\kappa}^2 * S = \int_0^{105} x^2 * (h_1(x) - h_2(x)) dx - x_{\kappa}^2 * S = 517508 \text{ mm}^4$$

$$I_{xy_{\kappa.\beta}} =$$

$$I_{xy} - x_{\kappa} * y_{\kappa} * S = \int_A x * y dA - x_{\kappa} * y_{\kappa} * S = \int_0^{105} x * \frac{(h_1(x) + h_2(x))}{2} * (h_1(x) - h_2(x)) dx - x_{\kappa} * y_{\kappa} * S = -11880.8 \text{ mm}^4$$

Τέλος, οι δευτεροβάθμιες ροπές αδράνειας κατά τη στροφή της διατομής κατά γωνία  $\theta = -\alpha$  (ως εντός εναλλάξ), είναι:



Σχήμα 4.2.5.

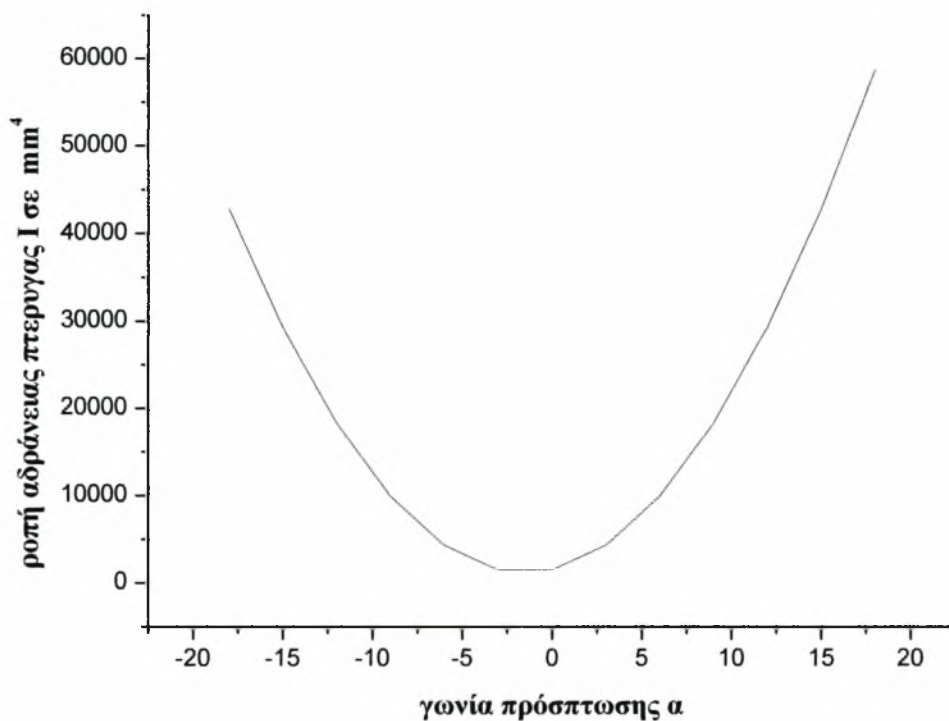
$$I_x(\theta) = \frac{I_{x_{\kappa.\beta}} + I_{y_{\kappa.\beta}}}{2} + \frac{I_{x_{\kappa.\beta}} - I_{y_{\kappa.\beta}}}{2} * \cos[2 * \theta] + I_{xy_{\kappa.\beta}} * \sin[2 * \theta]$$

$$I_y(\theta) = \frac{I_{x_{κ.β}} + I_{y_{κ.β}}}{2} - \frac{I_{x_{κ.β}} - I_{y_{κ.β}}}{2} * \cos[2 * \theta] - I_{xy_{κ.β}} * \sin[2 * \theta]$$

$$I_{xy}(\theta) = - \frac{I_{x_{κ.β}} - I_{y_{κ.β}}}{2} * \sin[2 * \theta] + I_{xy_{κ.β}} * \cos[2 * \theta]$$

Στο πείραμά μας η δευτεροβάθμια ροπή αδράνειας που μας ενδιαφέρει περισσότερο είναι η  $I_x(\theta)$ .

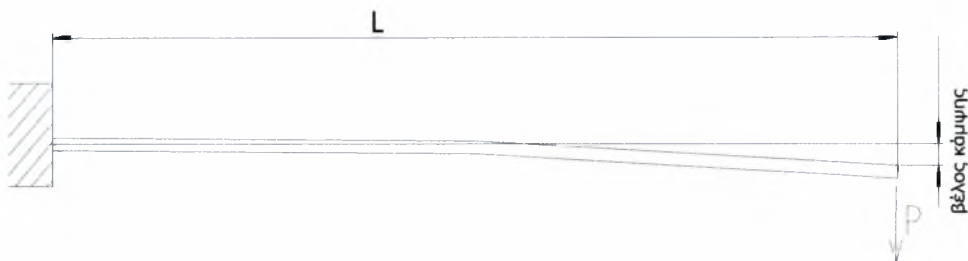
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η γραφική παράσταση της  $I_x(\theta)$  για τη συγκεκριμένη πτέρυγα και για γωνίες προσβολής από  $\alpha=18^\circ$  έως  $\alpha=-18^\circ$ .



Σχήμα 4.2.6.

#### ♦ Εύρεση του μέτρου ελαστικότητας πειραματικά.

Για να βρούμε το μέτρο ελαστικότητας της ελαστικής πτέρυγας κάναμε την παραδοχή ότι η πτέρυγα ισοδυναμεί με δύο προβόλους μήκους το μισό του μήκους της και πακτωμένους στο σημείο στήριξής της (σχήμα 4.2.7).



**Σχήμα 4.2.7.**

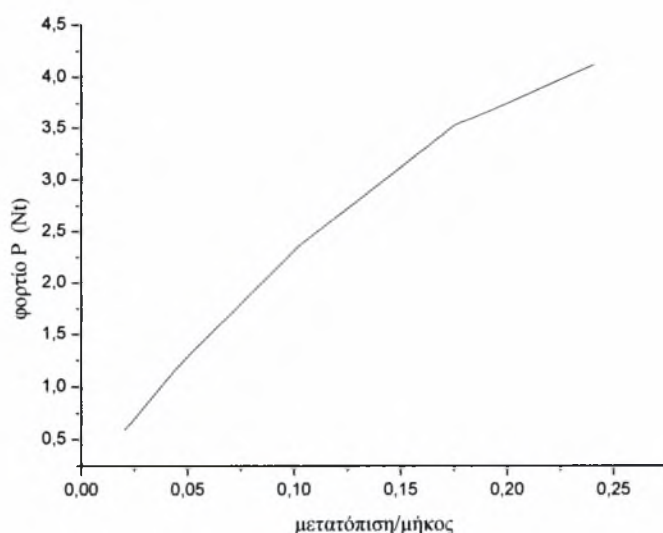
Αναρτώντας βαράκια μάζας  $m$  και μετρώντας το βέλος κάμψης (αγνοώντας το ίδιο βάρος της πτέρυγας το οποίο είναι της τάξεως των 4 γραμμαρίων και θεωρώντας τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της δύναμης  $P$  μηδενική σε σχέση με το μήκος  $L$  της πτέρυγας), μπορούμε να βρούμε το μέτρο ελαστικότητας εφόσον: η δύναμη  $P$  είναι γνωστή και ίση με  $m \cdot g$  σε Newton, το μήκος  $L$  είναι γνωστό και ίσο με 245 mm και η ροπή αδράνειας της διατομής ως προς τον οριζόντιο άξονα  $x$   $I_x = 1430 \text{ mm}^4$ .

Ο τύπος που χρησιμοποιούμε είναι:

$$\text{βέλος κάμψης} = -\frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I_x} \rightarrow E = -\frac{P \cdot L^3}{3 \cdot (\text{βέλος κάμψης}) \cdot I_x}$$

Μετά από μια σειρά υπολογισμών βρίσκουμε με ικανοποιητική ακρίβεια το μέτρο ελαστικότητας  $E$  της πτέρυγας ίσο με **0.24 GPa**.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα φόρτισης – μετατόπισης της πτέρυγας, όπου διακρίνεται η γραμμικά ελαστική περιοχή (νόμος Poisson) για μετατόπιση έως 10 % περίπου.



**Σχήμα 4.2.8.**

Οι διαστάσεις της ελαστικής πτέρυγας και κυρίως τα εκπέτασμά της επιλέχθηκε 49 cm έτσι ώστε να έχει την καλύτερη εφαρμογή στα τοιχώματα της μετρητικής διαδρομής της αεροσήραγγας (πλάτος 52 cm) και να εμποδίζεται η ανακυκλοφορία στα ακροπερύγια χωρίς συγχρόνως να έχει επαφή σ' αυτά ή να εμποδίζεται η ταλάντωσή της.

Το υλικό της επιλέχθηκε έτσι ώστε το μέτρο ελαστικότητάς του να επιτρέπει μια μετρήσιμη τιμή εύρους ταλάντωσης στα ακροπερύγια για ασκούμενες ανωστικές δυνάμεις. Ένα πιο σκληρό (με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας) υλικό δεν θα εξυπηρετούσε τους σκοπούς της διπλωματικής γιατί θα ταλαντευόταν ανεπαίσθητα, ενώ ένα πιο μαλακό θα ταλαντευόταν με μεγάλο εύρος και δεν θα είχε την κατάλληλη αντοχή σε κάμψη.

### **4.3. Μετρητικά όργανα.**

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι : ανεμόμετρο θερμού νήματος για τη μέτρηση ταχυτήτων, παλμογράφος για την αναλογική απεικόνιση ηλεκτρικών σημάτων, πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο για τη μέτρηση επιταχύνσεων, ζυγαριά ελατηρίου για τη μέτρηση φορτίων, ψηφιακή βιντεοκάμερα για την καταγραφή εικόνας από την ταλάντωση της ελαστικής πτέρυγας και διάφορα μετρητικά όργανα όπως κανόνες και μοιρογνωμόνια για τη μέτρηση γωνιών και αποστάσεων.

#### **4.3.1. Ανεμόμετρο θερμού νήματος (hot-wire anemometer):**

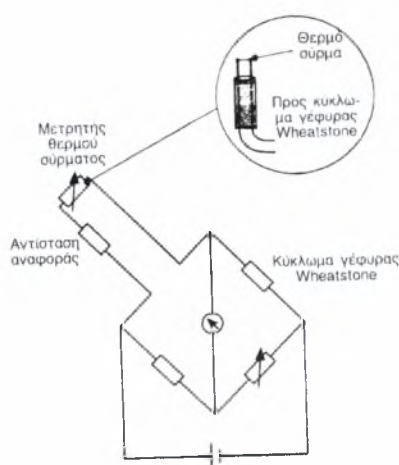
Το ανεμόμετρο θερμού νήματος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας αερίων και μόνο. Η λειτουργία έχει ως εξής: ένας μικρός αντιστάτης –σύρμα διαμέτρου της τάξης των 5  $\mu\text{m}$  που θερμαίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος αποτελεί τμήμα μίας γέφυρας Wheatstone. Η αρχή στην οποία στηρίζεται αυτού του τύπου το ανεμόμετρο είναι ότι κατά τη ροή ενός ρευστού γύρω από ένα θερμό σώμα, στην προκειμένη περίπτωση αέρα, διαφορετικής θερμοκρασίας τότε το θερμό σώμα θα ψυχθεί με ρυθμό ψύξης άμεσα εξαρτώμενο της ταχύτητας του ρευστού. Έτσι, εφαρμόζοντας σταθερό ρεύμα στο σύρμα, η ψύξη θα προκαλέσει αλλαγή της αντίστασής του και επομένως αλλαγή της πτώσης τάσης στα άκρα του (διότι  $V=I \cdot R$ ). Άρα μετρώντας με τη βοήθεια κυκλώματος γέφυρας Wheatstone αυτή την αλλαγή τάσης και με



την κατάλληλη βαθμονόμηση μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα ροής του αερίου.

Επίσης ,με άλλο τρόπο, εάν ρυθμίσουμε το ρεύμα ώστε η θερμοκρασία του σύρματος να διατηρείται σταθερή τότε η τιμή του ρεύματος πάλι θα σχετίζεται με την ταχύτητα του αερίου.

Τα ανεμόμετρα θερμού νήματος περιέχουν όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για τη βαθμονόμησή τους με τη μορφή γραφικών πραστάσεων . Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση μεγάλου εύρους ταχυτήτων , από πολύ μικρές (0.03 m/s) έως υπερηχητικές και είναι ιδανικά για ασταθείς ροές. (σχήμα 4.3.1.1).



**Σχήμα 4.3.1.1**

### **Βαθμονόμηση ανεμομέτρου.**

Όπως προαναφέραμε η ένδειξη του ανεμομέτρου είναι σε Volts. Για να παίρνουμε τιμές ταχύτητας χρειάζεται να δημιουργήσουμε μια συνάρτηση που μετατρέπει τα Volts σε m/s με την ακρίβεια την οποία εμείς απαιτούμε.

Αυτό έγινε με τη βοήθεια ενός ήδη βαθμονομημένου ψηφιακού ανεμομέτρου. Αντιστοιχίσαμε μετρηθείσες τιμές Volts με ενδείξεις ταχύτητας από το ψηφιακό ανεμόμετρο και με τη βοήθεια λογισμικού δημιουργήσαμε τη συνάρτηση παρεμβολής αυτών των τιμών. Η συνάρτηση αυτή είναι το παρακάτω πολυώνυμο πέμπτου βαθμού ακρίβειας της τάξης του  $10^{-5}$  (δηλαδή προσέγγιση της ταχύτητας με ακρίβεια πέμπτου δεκαδικού ψηφίου) :

$$U = A0 + A1 * V + A2 * V^2 + A3 * V^3 + A4 * V^4 + A5 * V^5$$

με συντελεστές βαθμονόμησης :

**A0=139. 38815**  
**A1=747. 35457**  
**A2=1573. 26588**  
**A3=1628. 88017**  
**A4=828. 49067**  
**A5=162. 50848**

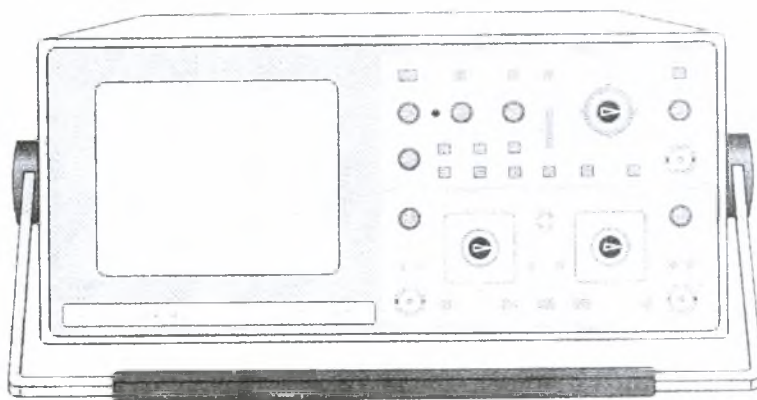
#### 4.3.2. Παλμογράφος.

Ο παλμογράφος (cathode ray oscilloscope) , που παλαιότερα ονομαζόταν ταλαντοσκόπιο καθοδικών ακτίνων , χρησιμοποιείται για τη λεπτομερή παρουσίαση ηλεκτρικών σημάτων που παράγουν οι διάφοροι μετατροπείς . Ο παλμογράφος εμφανίζει τα ηλεκτρικά σήματα ως κυματομορφές με εξαιρετική ακρίβεια . Η οθόνη του παλμογράφου έχει τη μορφή γραφικής παράστασης όπου στον οριζόντιο άξονα εμφανίζεται ο χρόνος και στον κατακόρυφο η τάση. Για την εμφάνιση των ηλεκτρικών σημάτων , ο παλμογράφος χρησιμοποιεί έναν **καθοδικό σωλήνα** (cathode ray tube) ίδιου τύπου με αυτόν που υπάρχει στις συσκευές τηλεόρασης και στις οθόνες των υπολογιστών. Αυτός αποτελείται από έναν σωλήνα που επικρατούν συνθήκες κενού και κατά μήκος του περνά μια συνεχής δέσμη ηλεκτρονίων. Η δέσμη αυτή δημιουργείται από μια συσκευή που λέγεται πυροβόλο ηλεκτρονίων ή ηλεκτρονικό πυροβόλο (electron gun) και προσπίπτει σε μια φθορίζουσα οθόνη. Στο σημείο όπου προσπίπτει σχηματίζεται μια μικρή φωτεινή κουκίδα. Η δέσμη μπορεί να κινείται κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με τη βοήθεια δύο τάσεων που εφαρμόζονται σε δύο ζεύγη πυκνωτών στο εσωτερικό του σωλήνα και αναγκάζουν τη δέσμη να αποκλίνει.

Το σήμα εξόδου ενός μετατροπέα μεταφέρεται στον παλμογράφο συνήθως με τη βοήθεια ενός ζεύγους ακροδεκτών ή συνδέσμων που συνδέονται στον παλμογράφο. Το σήμα του μετατροπέα διαβιβάζεται στον πυκνωτή κατακόρυφης απόκλισης , που αναγκάζει τη δέσμη να αποκλίνει κατά τη διεύθυνση y. Ταυτόχρονα μία κατάλληλη μεταβαλλόμενη τάση δημιουργείται από τα εσωτερικά κυκλώματα του οργάνου και εφαρμόζεται στον πυκνωτή οριζόντιας απόκλισης . Η τάση αυτή αυξάνει γραμμικά και αναγκάζει τη δέσμη να κινείται οριζόντια και από αριστερά προς τα δεξιά , οπότε παρέχει ένα γραμμικό άξονα που

μπορεί να βαθμολογηθεί σε μονάδες χρόνου (συνήθως ms). Η ταχύτητα κίνησης της κουκίδας μπορεί να γίνει τόσο μεγάλη έτσι ώστε να σχηματίζεται μια συνεχής οριζόντια γραμμή στην οθόνη.

Ο παλμογράφος έχει περιστροφικούς επιλογείς για τον έλεγχο της ευαισθησίας των κλιμάκων x,y, την λαμπρότητα και την ευκρίνεια (εστίαση) και για να συγχρονίζει τις αποκλίσεις κατά τις δύο διευθύνσεις x,y. Η οθόνη του οργάνου έχει στο εξωτερικό της μέρος ένα πλέγμα με κλίμακα, ώστε να μπορούμε εύκολα σχετικά να υπολογίζουμε τις



**Σχήμα 4.3.2.1.**

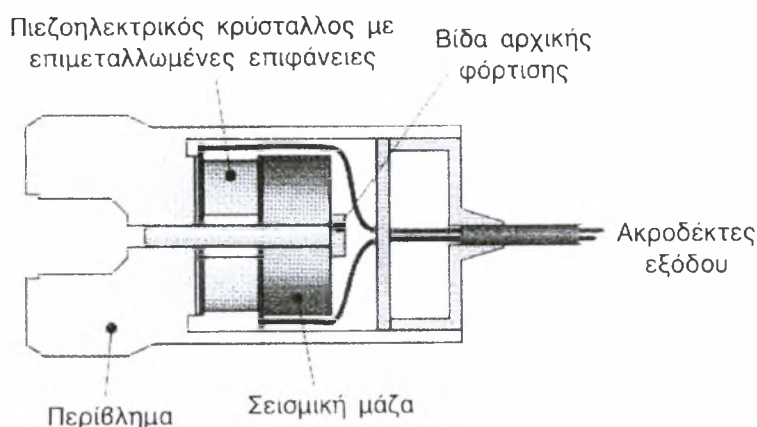
συντεταγμένες ενός σήματος. Από την κυματομορφή που απεικονίζεται στην οθόνη μπορούν να υπολογιστούν το σχήμα, το πλάτος ή συχνότητα και κάθε άλλη δυνατή πληροφορία για το σήμα. Οι παλμογράφοι γενικά είναι πάρα πολύ χρήσιμα όργανα για την απεικόνιση σημάτων, έχουν μεγάλη ακρίβεια και χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο εξοπλισμού, στην έρευνα και την ανάπτυξη. (σχήμα 4.3.2.1).

#### **4.3.3. Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο (piezoelectric accelerometer):**

Το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο είναι από τους πιο διαδεδομένους τύπους επιταχυνσιομέτρων. Αποτελείται από μια μάζα η οποία είναι συνδεδεμένη με έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο και όλα μαζί είναι μέσα σε κάποιο περίβλημα. Η μάζα στερεώνεται με μια βίδα απέναντι στον κρύσταλλο. Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου οργάνου βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο δηλαδή στο φαινόμενο κατά το οποίο εμφανίζονται ηλεκτρικά φορτία αντίθετου προσήμου στις απέναντι πλευρές ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου όταν αυτός

υφίσταται μηχανική τάση (πιέζεται, δηλαδή του ασκείται δύναμη). Το φορτίο αυτό είναι ανάλογο της μηχανικής τάσης. Η απαιτούμενη δύναμη στο επιταχυνσιόμετρο ασκείται στη μάζα  $m$  και είναι  $m \cdot a$  όπου  $a$  η επιτάχυνση της μάζας. Οι απέναντι επιφάνειες του κρυστάλλου εφάπτονται σε ηλεκτρικό κύκλωμα. Το κύκλωμα αυτό είναι γνωστό ως ενισχυτής φορτίου (charge amplifier) και παράγει μια ωφέλιμη τάση εξόδου από το φορτίο που αναπτύσσεται στον κρύσταλλο. Η τάση αυτή είναι ανάλογη της επιτάχυνσης του μετατροπέα και μπορεί να εμφανιστεί στην οθόνη ενός κατάλληλα βαθμονομημένου βολτομέτρου.

Οι κρύσταλλοι που συνηθέστερα χρησιμοποιούνται είναι ο χαλαζίας (quartz) και το τρυγικό νάτριο ή κάλιο. Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα εμφανίζουν καλή απόκριση σε σχετικά υψηλές συχνότητες. Οι μετατροπείς είναι μικροί και ελαφροί (5-10 gr) και αντέχουν πολύ υψηλές επιταχύνσεις της τάξεως των 25000 g. Τυπικές εφαρμογές τους είναι εκεί που εμφανίζονται υψίσυχνες και ισχυρές επιταχύνσεις, όπως στις δοκιμές κρούσεων.(σχήμα 4.3.3.1).



**Σχήμα 4.3.3.1.**

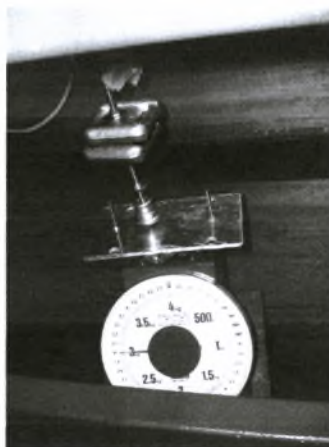
Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των επιταχυνσιομέτρων που χρησιμοποιήσαμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Εύρος	+ - 10 g
Ευαισθησία (+-5%)	500 mV/g
Συχνотική απόκριση	0,8 – 5000 Hz
Θερμοκρασία λειτουργίας	0-65 °C
Μάζα	6 gr
Τροφοδοσία	20....30 VDC
Χρονική σταθερά	1 s
Θερμοκρασιακή ευαισθησία	+0.08 %/K
Τύπος	8632C5

### Πίνακας 4.3.3.1.

#### 4.3.4. Ζυγαριά ελατηρίου .

Για τη μέτρηση των φορτίων στις πτέρυγες χρησιμοποιήθηκε μια ζυγαριά ελατηρίου ακρίβειας περίπου  $\pm 3\%$ .(σχήμα 4.3.4.1).



Σχήμα 4.3.4.1.

Κάθε υποδιαίρεση αντιστοιχεί σε 10 γραμμάρια.

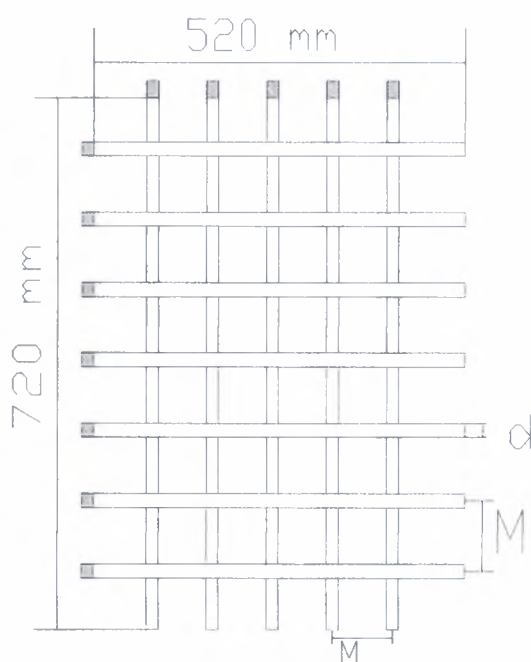
#### 4.3.5. Ψηφιακή βιντεοκάμερα.

Για την απεικόνιση της ταλάντωσης της ελαστικής πτέρυγας που βοήθησε στην οπτική επεξεργασία της χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή βιντεοκάμερα υψηλής ανάλυσης εικόνας και ταχύτητας λήψης **25 frames/sec.**



#### 4.4.Δημιουργία ισότροπης τύρβης.

Για τη δημιουργία σχεδόν ισότροπης και ομοιογενούς τύρβης κατασκευάστηκε ξύλινο πλέγμα (grid) ράβδων ισαπέχοντων και κάθετων μεταξύ τους .(σχήμα 4.4.1)



Σχήμα 4.4.1

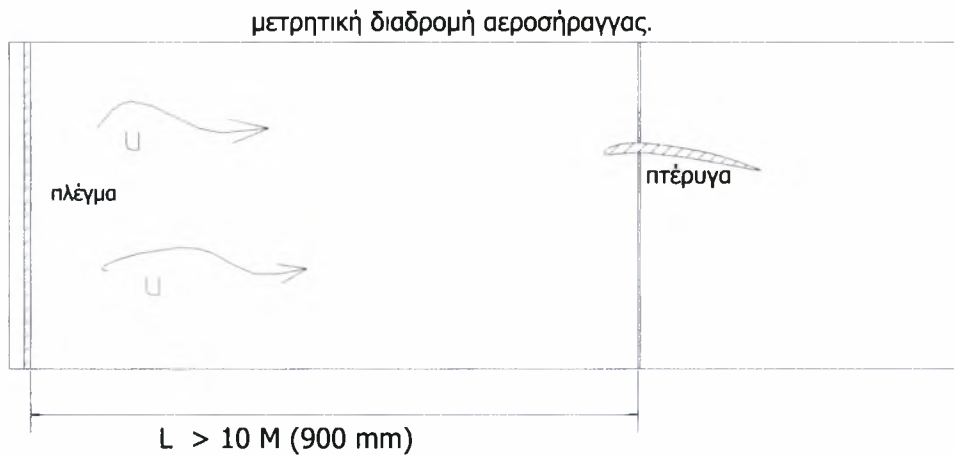
Οι κύριες διαστάσεις του πλέγματος είναι :  $M = 90 \text{ mm}$ , ύψος =  $720 \text{ mm}$ , πλάτος =  $520 \text{ mm}$ , πάχος  $d = 18 \text{ mm}$ .

Οι κύριες διαστάσεις επιλέχτηκαν έτσι ώστε να είναι σύμφωνες με τα τυποποιημένα πρότυπα πλεγμάτων για τη δημιουργία ισότροπης τύρβης ( $4 < M / d < 5.5$ ). Επίσης η τοποθέτηση του πλέγματος πρέπει να γίνει σε απόσταση  $L > 10 M$  πριν το σημείο τοποθέτησης των μοντέλων κατά την κατεύθυνση της ροής μέσα στη μετρητική διαδρομή της αεροσήραγγας, όπου σχεδόν ομοιογενοποιείται η τύρβη.(σχήμα 4.4.2).

Το πλέγμα τοποθετήθηκε στο σημείο  $(0, y, z)$  της μετρητικής διαδρομής της αεροσήραγγας κάθετα στον άξονα των  $x$ .

Η περιγραφή του πεδίου ροής (τύρβης) που δημιουργείται από το πλέγμα γίνεται διεξοδικά στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.





**Σχήμα 4.4.2.**

#### 4.5. Λογισμικό επεξεργασίας των μετρήσεων.

Η συλλογή, μετατροπή και αποθήκευση δεδομένων από τα διάφορα μετρητικά όργανα (ανεμόμετρο, επιταχυνσιόμετρα κ.λ.π) έγινε με τη βοήθεια του **Labview**. Το Labview είναι ένα πρόγραμμα ιδιαίτερα χρήσιμο στις εργαστηριακές μετρήσεις. Ρυθμίζοντας διάφορες παραμέτρους και μέσω της κατάλληλης συνδεσμολογίας αυτό το πρόγραμμα μας δίνει την ευχέρεια να λάβουμε μετρήσεις οι οποίες συνήθως είναι σε Volts στην έξοδο των μετρητικών μας οργάνων, να ορίσουμε μια συνάρτηση μετατροπής των Volts στις κατάλληλες μονάδες καθώς και τη συχνότητα δειγματοληψίας και τελικά να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα μας σε εύχρηστα αρχεία. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η εικόνα αυτού του προγράμματος.



**Εικόνα 4.5.1.**

Στις δικές μας μετρήσεις για παράδειγμα χρησιμοποιήσαμε συχνότητες δειγματοληψίας 500,1000 και 2000 μετρήσεων το δευτερόλεπτο. Το κριτήριο για αυτή την επιλογή ήταν η όσο το δυνατόν καλύτερη περιγραφή των φαινομένων μέσω των μετρήσεων αλλά συγχρόνως και ο περιορισμός του μεγάλου πλήθους και μεγέθους των αρχειοθετημένων μετρήσεων .

Επίσης το Labview έχει τη δυνατότητα άμεσης στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων , δίνοντας ταυτόχρονα την τυπική τους απόκλιση , μέγιστες ,ελάχιστες και μέσες τιμές.

Για την ανάλυση με οπτική μέθοδο της ταλάντωσης της ελαστικής πτέρυγας καθώς και για τη συσχέτιση δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν προγράμματα γραμμένα σε **matlab**. Ειδικότερα για την οπτική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ένα ήδη έτοιμο πρόγραμμα το οποίο μετρούσε , με τη βοήθεια κάποιων κατάλληλων σε κάθε περίπτωση παραμέτρων , τη μετατόπιση του ακροπερυγίου. Αυτό γινόταν μετρώντας τον αριθμό των pixels (στις βιντεοσκοπημένες εικόνες) της μετακίνησης προκαθορισμένου σημείου διαφορετικού χρώματος πάνω στο ακροπερύγιο σε σχέση με σταθερό σημείο. Επομένως γνωρίζοντας το μέγεθος σε χιλιοστά του κάθε pixel αναγάγαμε τη μετατόπιση σε χιλιοστά.

Χρησιμοποιήθηκαν επίσης προγράμματα σε γλώσσα προγραμματισμού **fortran** για την επεξεργασία δεδομένων-αρχείων και την πινακοποίησή τους.

Τέλος , για την επεξεργασία και απεικόνιση σε διαγράμματα των πειραματικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα **Excel-Origin**.

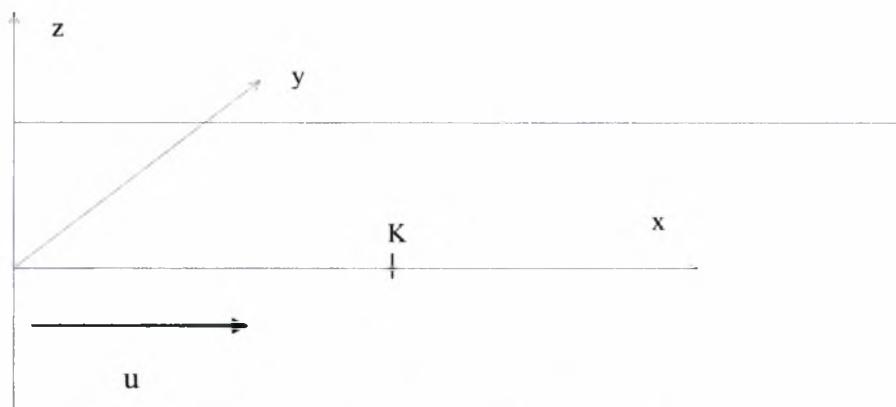
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

### 5.1. Περιγραφή του πεδίου ροής.

#### 5.1.1. Βαθμονόμηση της αεροσήραγγας σε στρωτή και τυρβώδη ροή .

Η βαθμονόμηση της αεροσήραγγας έγινε σε ένα συγκεκριμένο σημείο, στο σημείο όπου τοποθετούνται τα μοντέλα μας μέσα στη μετρητική διαδρομή της αεροσήραγγας. Η βαθμονόμηση της αεροσήραγγας προϋποθέτει τη βαθμονόμηση του ανεμομέτρου μεγάλης ευαισθησίας που χρησιμοποιούμε.

Οι μετρήσεις με το ανεμόμετρο και για στρωτή και για τυρβώδη ροή γίνονται στο σημείο **K** ( $x = 110 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$ ,  $z = 0 \text{ mm}$ ) ως προς τον κεντρικό άξονα της μετρητικής διαδρομής της αεροσήραγγας όπου τοποθετούνται τα μοντέλα μας (πτέρυγες) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Μετρητική διαδρομή

Σχήμα 5.1.1.

**\*\***(σημείο  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$ ,  $z = 0 \text{ mm}$  στο κέντρο του πλέγματος)

Τα αποτελέσματα που πήραμε είναι τα εξής , για στρωτή και τυρβώδη ροή αντίστοιχα:

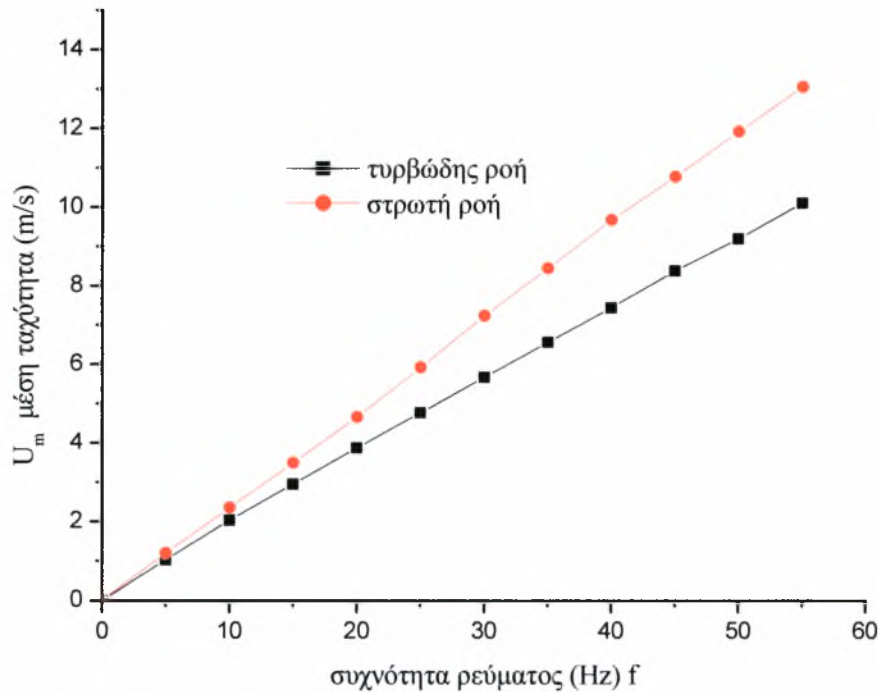
<b>Στρωτή ροή</b>	
<b>Συχνότ. ρεύματος f (Hz)</b>	<b>μέση ταχύτ. αέρα στην αεροσήραγγα (m/s)</b>
0	0
5	1.183
10	2.34
15	3.48
20	4.65
25	5.91
30	7.22
35	8.43
40	9.66
45	10.75
50	11.91
55	13.05

**Πίνακας 5.1.1.**

<b>Τυρβώδης ροή</b>	
<b>Συχνότ. ρεύματος f (Hz)</b>	<b>μέση ταχύτ. αέρα στην αεροσήραγγα (m/s)</b>
0	0
5	1.03
10	2.04
15	2.95
20	3.87
25	4.77
30	5.67
35	6.56
40	7.44
45	8.38
50	9.2
55	10.1

**Πίνακας 5.1.2.**

Οι γραφικές παραστάσεις των παραπάνω αποτελεσμάτων , φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



**Σχήμα 5.1.2.**

Όπως παρατηρούμε , για την ίδια ισχύ του φυσητήρα της αεροσήραγγας, στη στρωτή ροή μετρήσαμε μεγαλύτερες μέσες ταχύτητες. Αυτό οφείλεται αφ'ενός στην αντίσταση που παρεμβάλλει στη ροή η εισαγωγή του πλέγματος αλλά κυρίως στη διασπορά της ενέργειας της ροής κατά την τυρβώδη ροή προς τις τρεις κατευθύνσεις .

Η ταχύτητα στην αεροσήραγγα , βάσει των αποτελεσμάτων , μπορεί να προσεγγισθεί συναρτήσει της συχνότητας του ρεύματος τροφοδοσίας του φυσητήρα για τυρβώδη και στρωτή ροή αντίστοιχα με τις παρακάτω ευθείες:

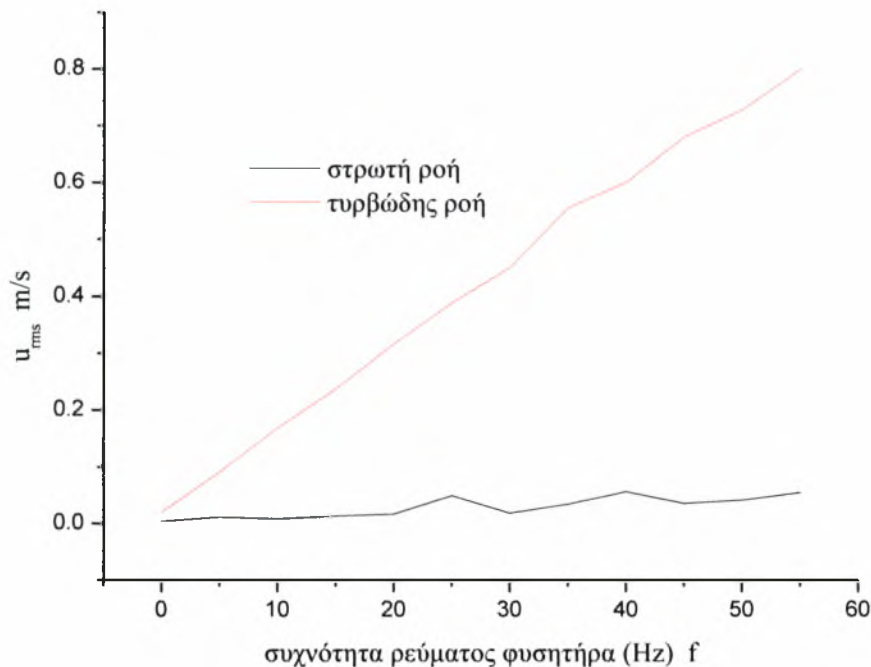
**Τυρβώδης ροή:**

$$U_m = \frac{10.1}{55} * f \quad \text{m/s}$$

## Στρωτή ροή:

$$U_m = \frac{13.05}{55} * f \quad \text{m/s}$$

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα μέσης τυπικής απόκλισης ταχύτητας για στρωτή και τυρβώδη ροή συναρτήσει της συχνότητας του ρεύματος τροφοδοσίας.



**Σχήμα 5.1.3.**

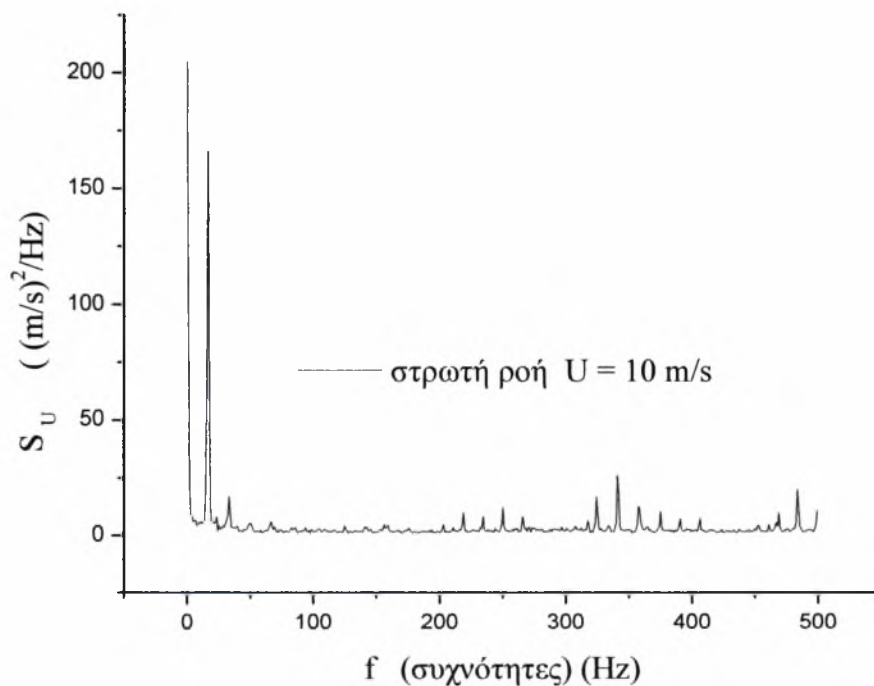
Όπως ήταν αναμενόμενο στην τυρβώδη ροή παρατηρείται μεγαλύτερη διακύμανση της μέσης τυπικής απόκλισης της ταχύτητας. Αυτό οφείλεται στην τυχαιότητα του πεδίου ροής (χαρακτηριστικό των τυρβωδών ροών) και τη διασπορά της κινητικής ενέργειας (ταχύτητας) σε τρεις συνιστώσες



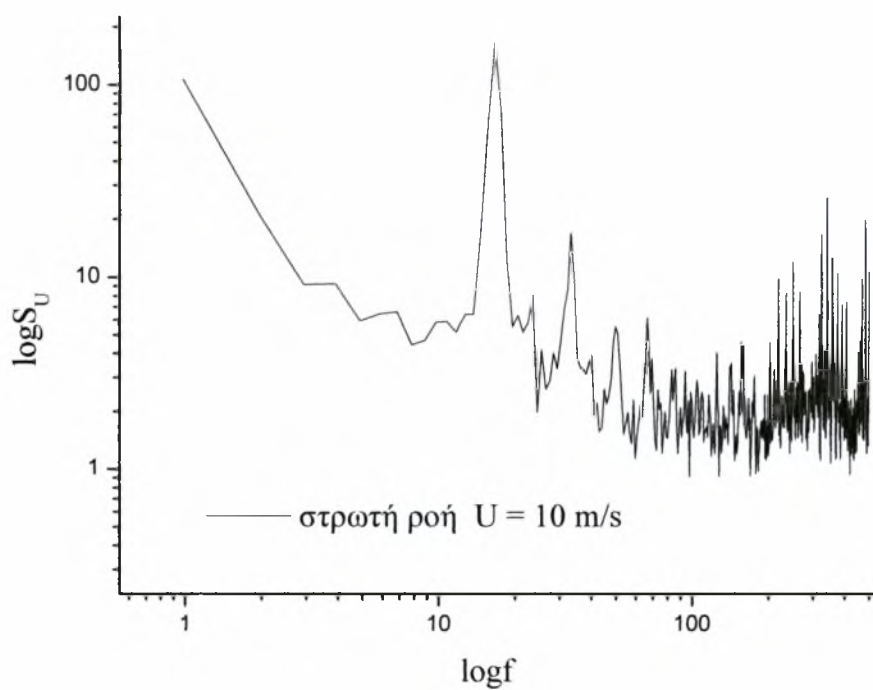
### 5.1.2. Φάσματα ισχύος των συχνοτήτων της ταχύτητας σε στρωτή και τυρβώδη ροή.

#### i) Στρωτή ροή.

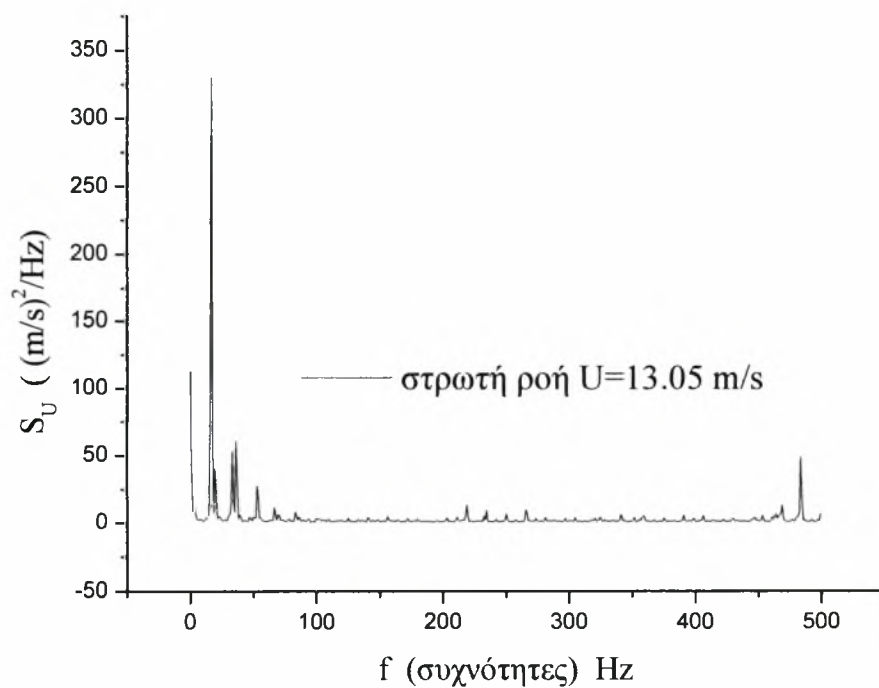
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα φάσματα ισχύος των ταχυτήτων  $S_U$  συναρτήσει της συχνότητας  $f$ , σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα για στρωτή ροή, σε διαφορετικές ταχύτητες. Όλες οι μετρήσεις έγιναν στο σημείο  $x = 105 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$ ,  $z = 0 \text{ mm}$  (δηλαδή 5 mm πριν την ακμή προσβολής της πτέρυγας).



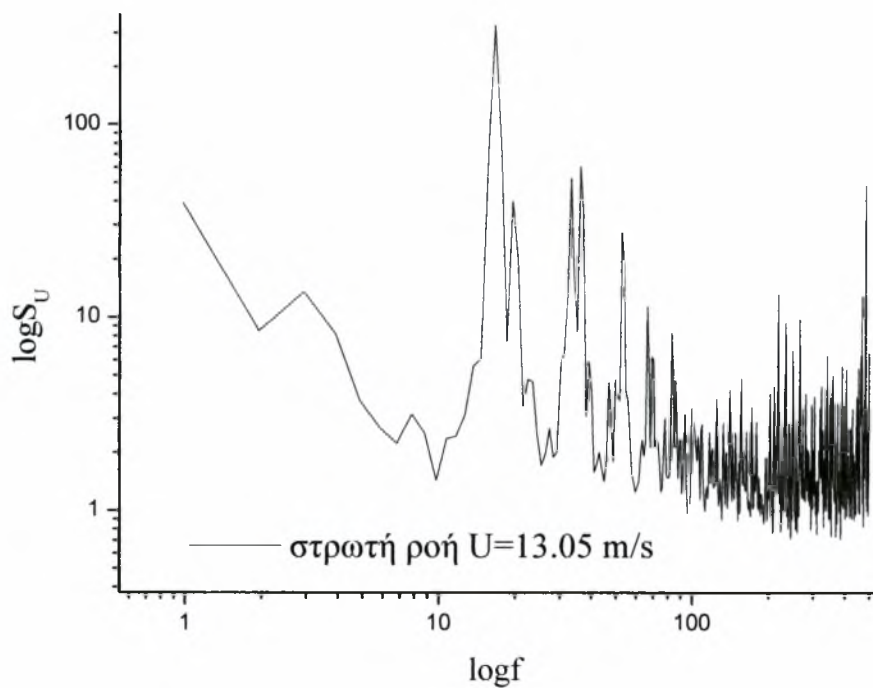
**Σχήμα 5.1.2.1**



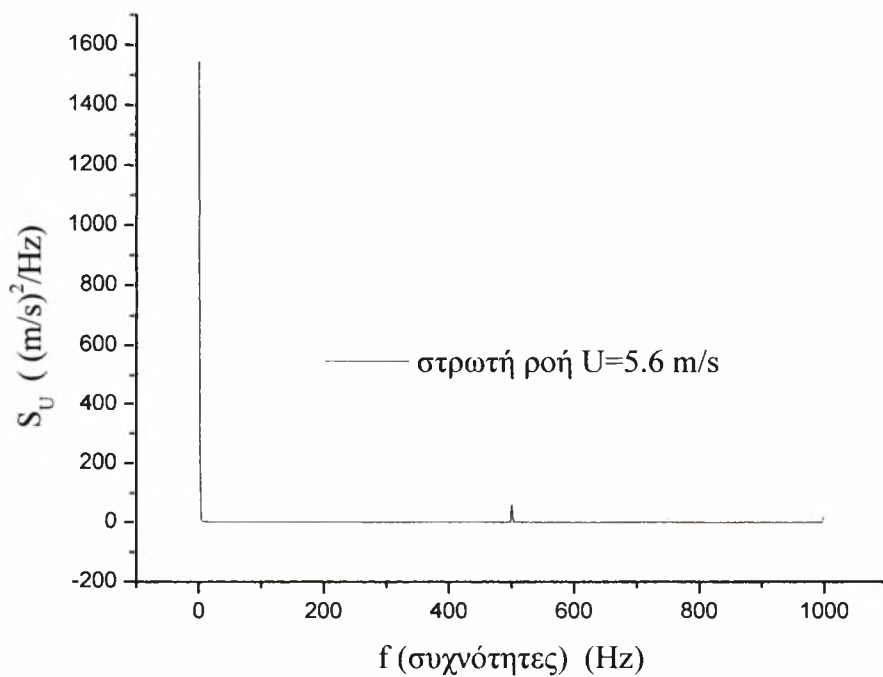
**Σχήμα 5.1.2.2**



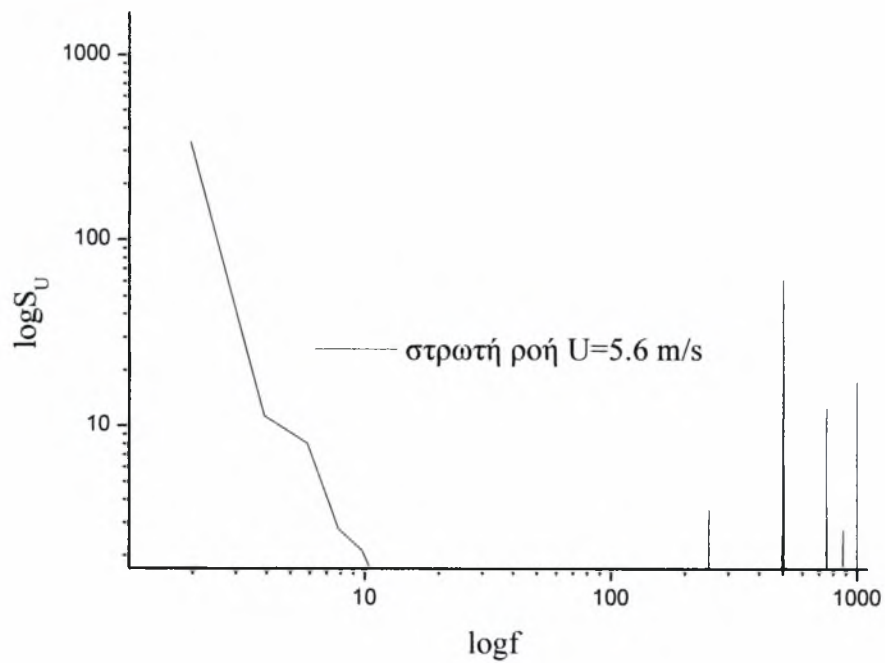
**Σχήμα 5.1.2.3**



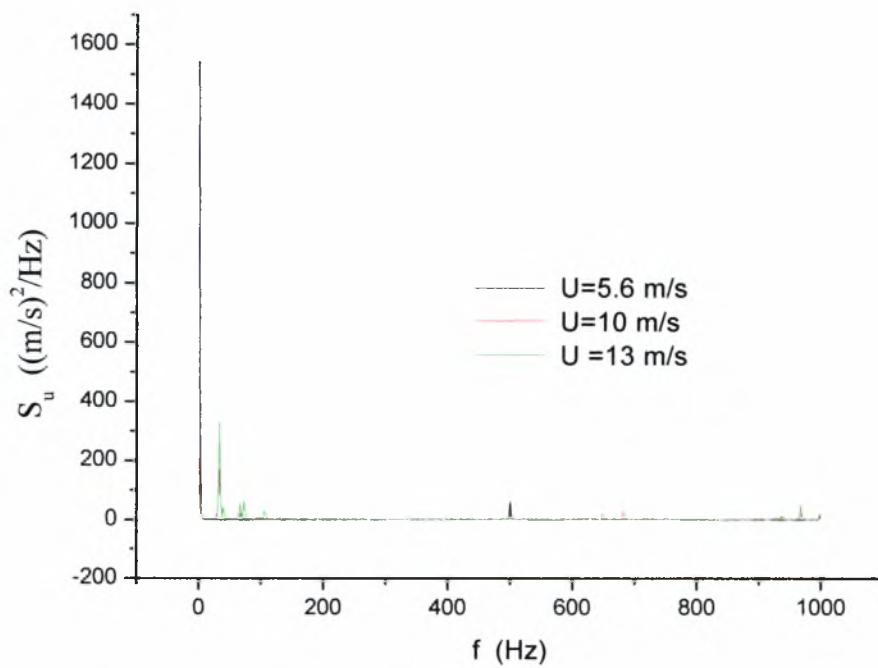
**Σχήμα 5.1.2.4**



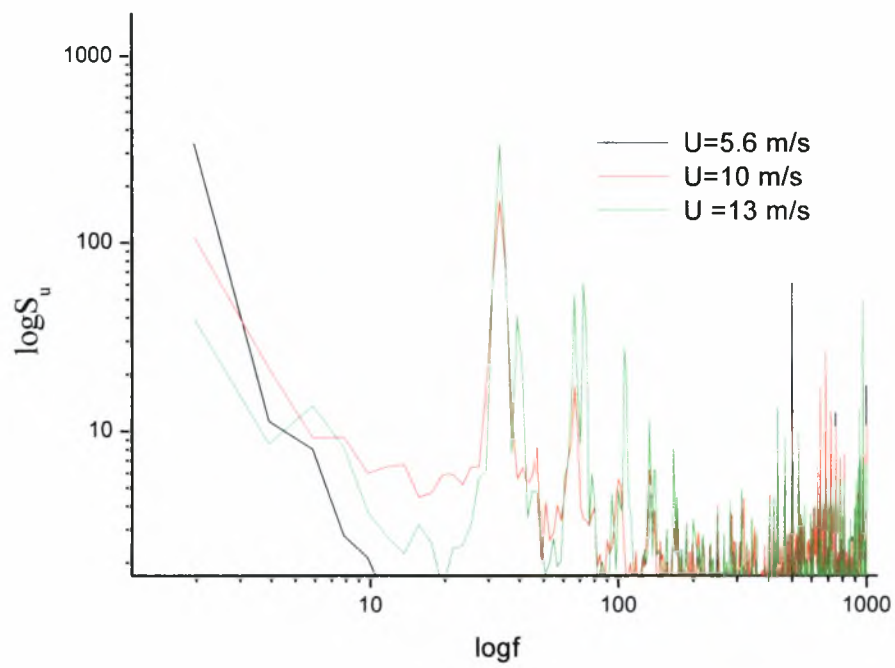
**Σχήμα 5.1.2.5**



**Σχήμα 5.1.2.6**



**Σχήμα 5.1.2.7. Συγκεντρωτικό διάγραμμα.**

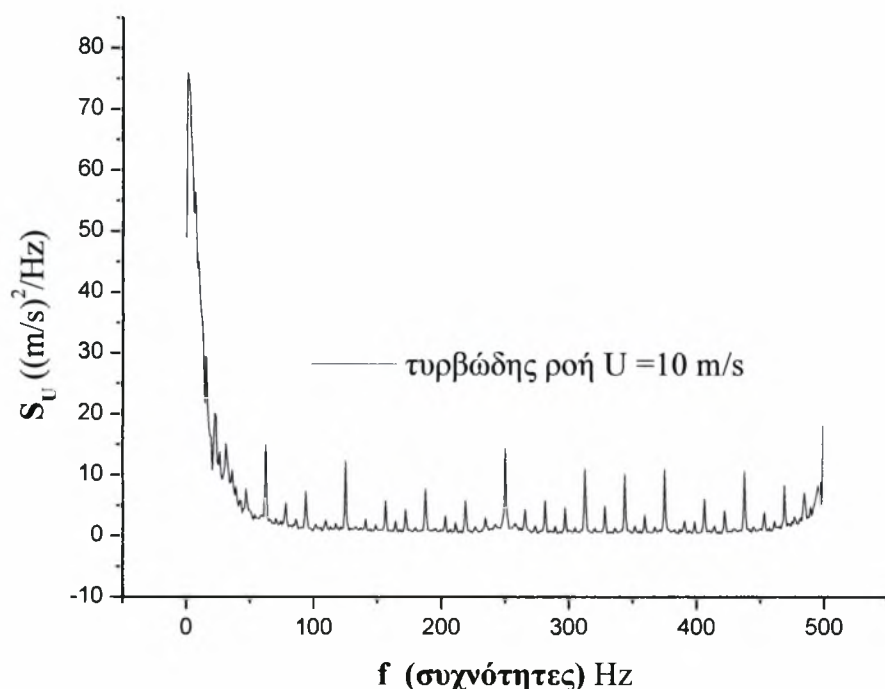


**Σχήμα 5.1.2.8. Συγκεντρωτικό διάγραμμα λογαριθμικό.**

## ii) Τυρβώδης ροή .

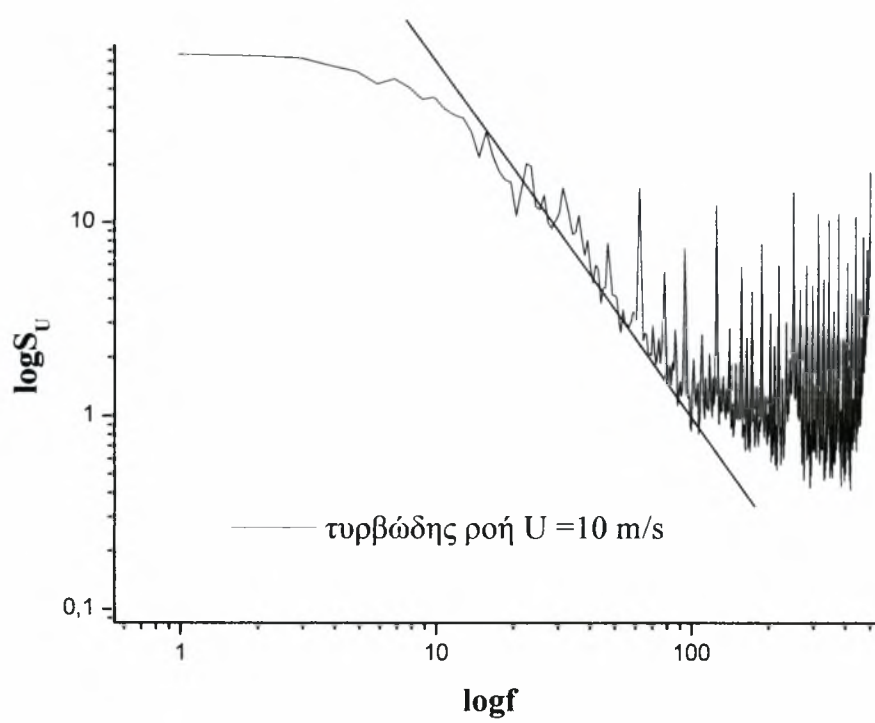
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται παραστατικά τα φάσματα ισχύος ταχύτητας  $S_U$  συναρτήσει της συχνότητας , σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα για τυρβώδη ροή σε διάφορες ταχύτητες ροής.

Όλες οι μετρήσεις έγιναν στο σημείο  $x = 105 \text{ mm}$  ,  $y = 0 \text{ mm}$  ,  $z = 0 \text{ mm}$  ( δηλαδή 5 mm πριν την ακμή προσβολής της πτέρυγας) .

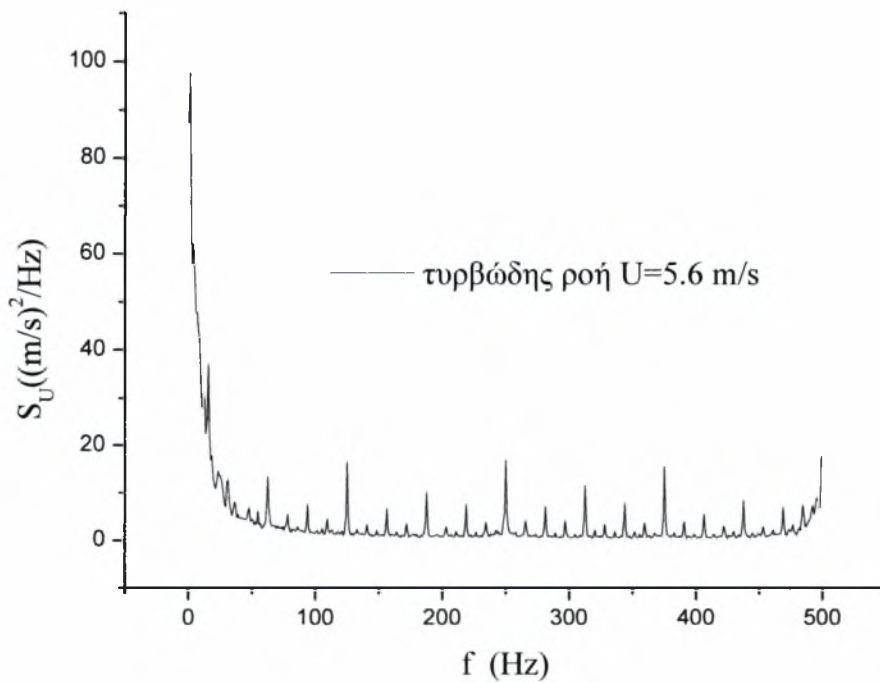


**Σχήμα 5.1.2.9**

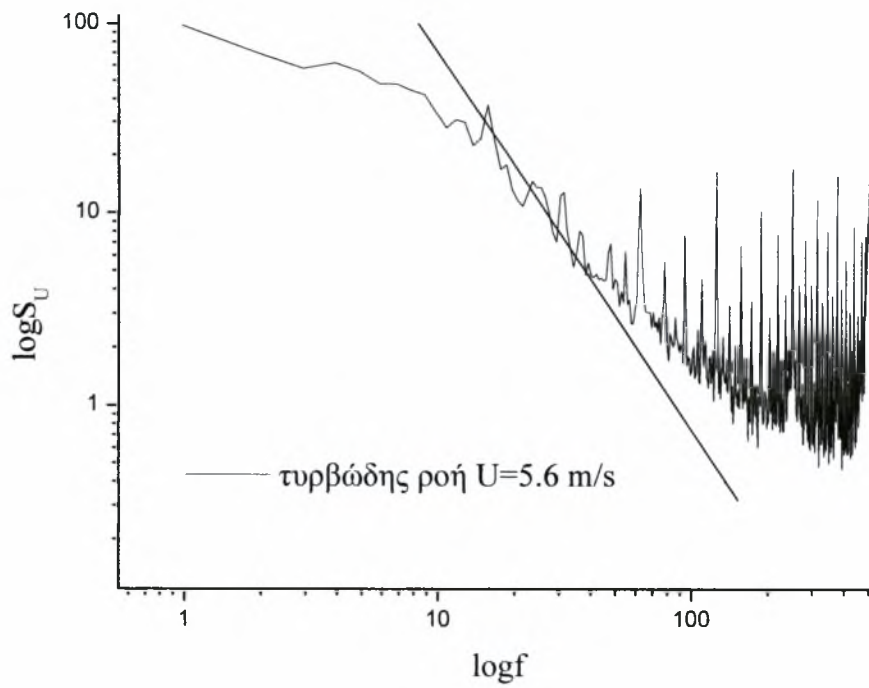




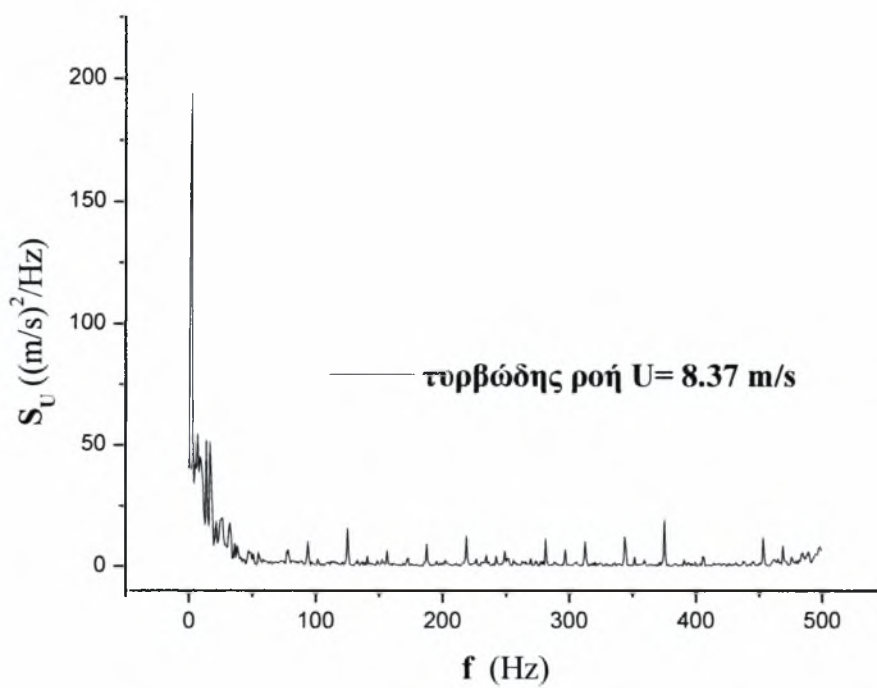
**Σχήμα 5.1.2.10**



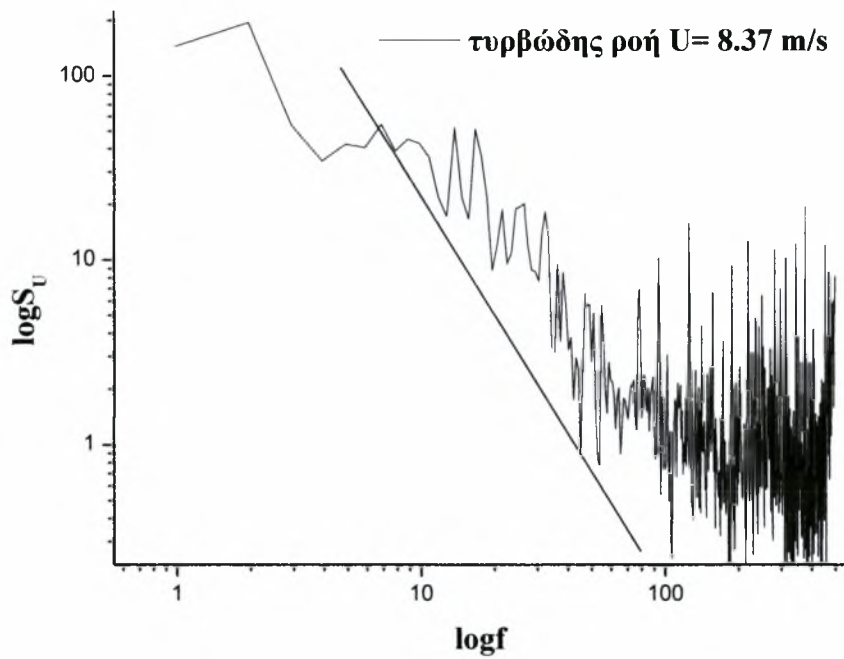
**Σχήμα 5.1.2.11**



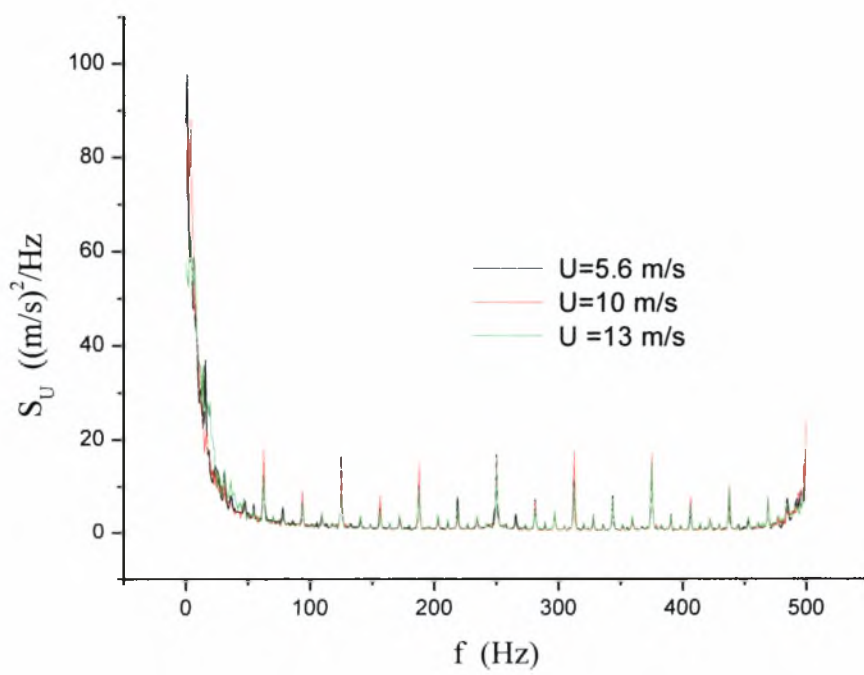
**Σχήμα 5.1.2.12**



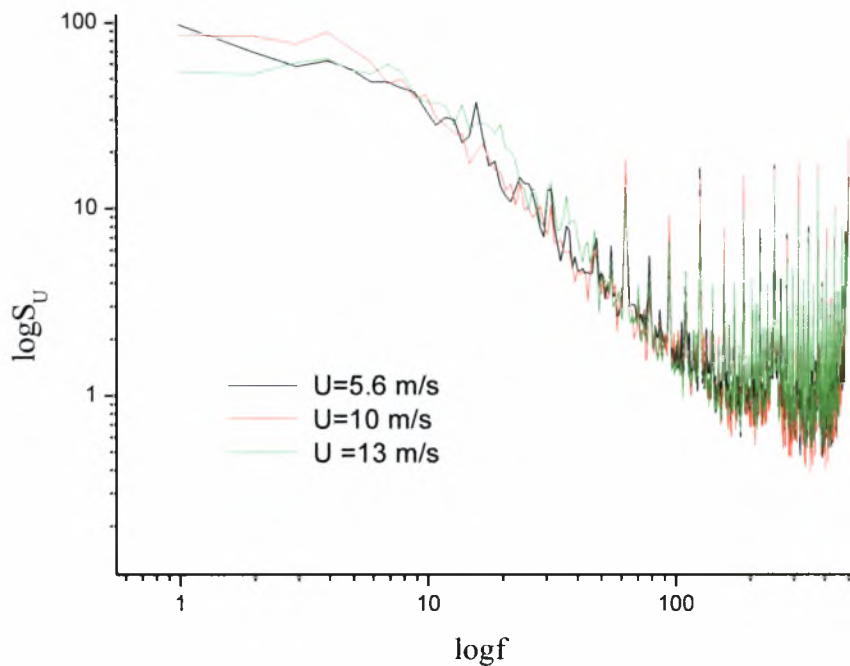
**Σχήμα 5.1.2.13**



**Σχήμα 5.1.2.14**



**Σχήμα 5.1.2.15. Συγκεντρωτικός.**



**Σχήμα 5.1.2.16. Συγκεντρωτικός λογαριθμικός.**

### **Σχόλια.**

Στα παραπάνω διαγράμματα λογαριθμικής κλίμακας είναι φανερή η κλίση του φάσματος  $-5/3$  για την τυρβώδη ροή, όπως αυστηρά προβλέπει η θεωρία της ανάλυσης **Kolmogorow**.

Στην στρωτή κυρίως ροή διακρίνονται στα διαγράμματα δύο ισχυρές συχνότητες στα 3 και τα 25 Hz.

Στην τυρβώδη ροή διακρίνονται πιο πολλές από δύο ‘ισχυρές’ συχνότητες.

### 5.1.3.Κλίμακες τύρβης και χρόνου.

Η κλίμακα μήκους της τύρβης μπορεί να εξαχθεί από το φάσμα ισχύος της ταχύτητας βάσει του τύπου :

$$L_x = \frac{U_m * S_u (n)}{4 * rms^2} * \left[ 1 + \left( 1.3392 * \left( \frac{2 \pi n L_x}{U_m} \right) \right)^2 \right]^{\frac{5}{6}}$$

όπου,

$L_x$ :κλίμακα μήκους τύρβης,

$U_m$ : μέση ταχύτητα,

$rms$ : μέση τυπική απόκλιση της ταχύτητας,

$n$ : συχνότητα,

$S_u(n)$  : φάσμα ισχύος συναρτήσει της συχνότητας.

Για απλούστευση της λύσης συνηθίζεται μια καλή προσέγγιση θέτωντας  $n=0$  , οπότε η παραπάνω σχέση απλοποιείται στην :

$$L_x = \frac{U_m * S_u (0)}{8 * SR}$$

όπου  $SR$  είναι η συχνότητα δειγματοληψίας.

Η κλίμακα χρόνου ισούται με:

$$T_x = \frac{L_x}{U_m}$$

Για την ισότροπη και ομοιογενή τυρβώδη ροή που δημιουργήσαμε, βρέθηκε για μέσες ταχύτητες **5.7 , 8.4 , 10.1** , κλίμακα τύρβης **6.2 , 6.85 και 7.2 cm** αντίστοιχα.

Οι αντίστοιχες τιμές κλίμακας χρόνου είναι **10 , 8.1 και 7.2 ms**.

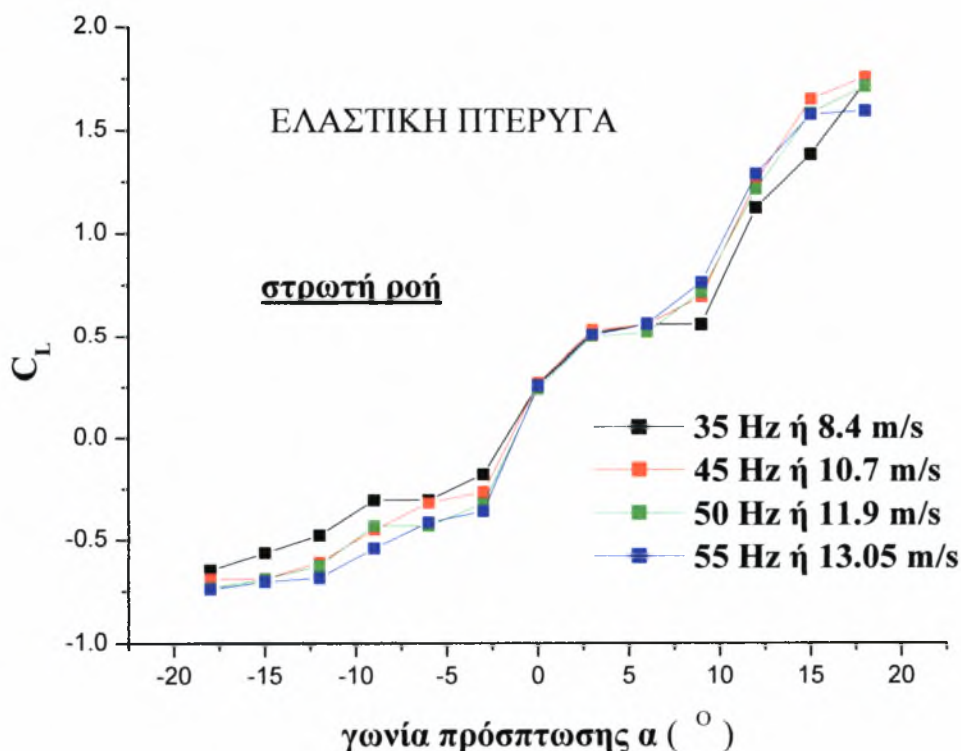
## 5.2. Μετρήσεις δυνάμεων.

Στις παρακάτω σελίδες παρουσιάζονται σε διαγράμματα οι πειραματικές μετρήσεις του μέσου συντελεστή άνωσης στις δύο πτέρυγες – μοντέλα (ελαστική και μη ελαστική) και συγκρίνονται με τις θεωρητικές τιμές για ιδεατή ροή (χωρίς τριβή).

### Πειραματικές τιμές συντελεστή άνωσης.

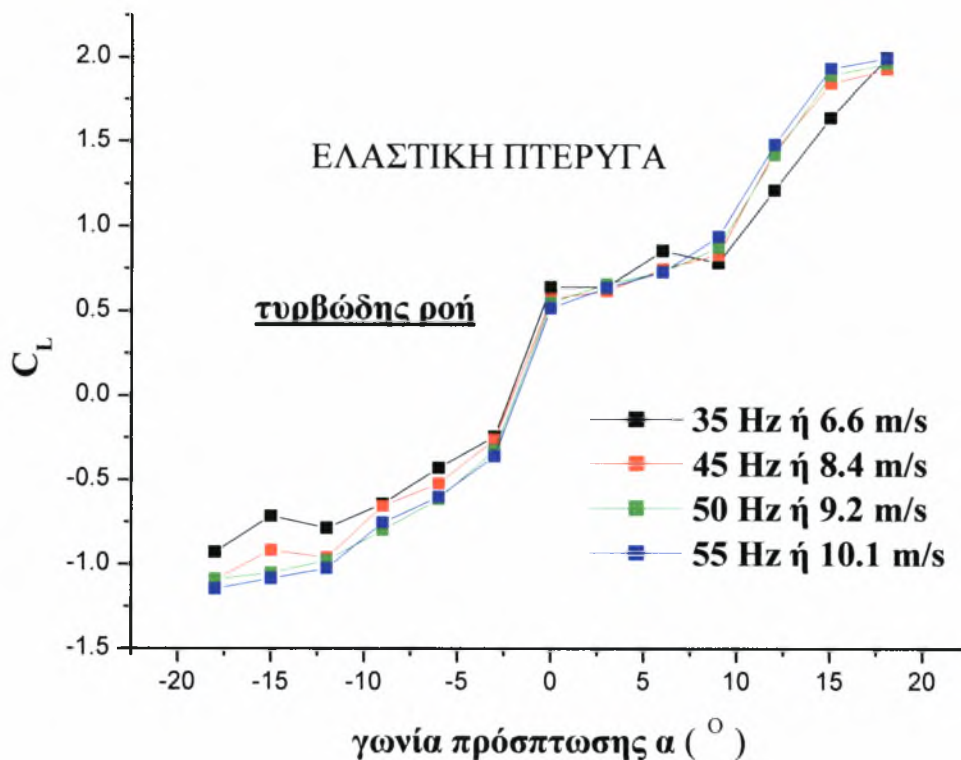
#### 5.2.1 Ελαστική πτέρυγα .

Οι μετρήσεις για τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή άνωσης στην ελαστική πτέρυγα έγιναν σε στρωτή και τυρβώδη ροή για διάφορους αριθμούς Reynolds και γωνίες προσβολής από  $-18$  έως  $18$  μοίρες. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων για το συντελεστή άνωσης που είναι πινακοποιημένα στο παράρτημα Α.



Σχήμα 5.2.1





Σχήμα 5.2.2

### Σχόλια .

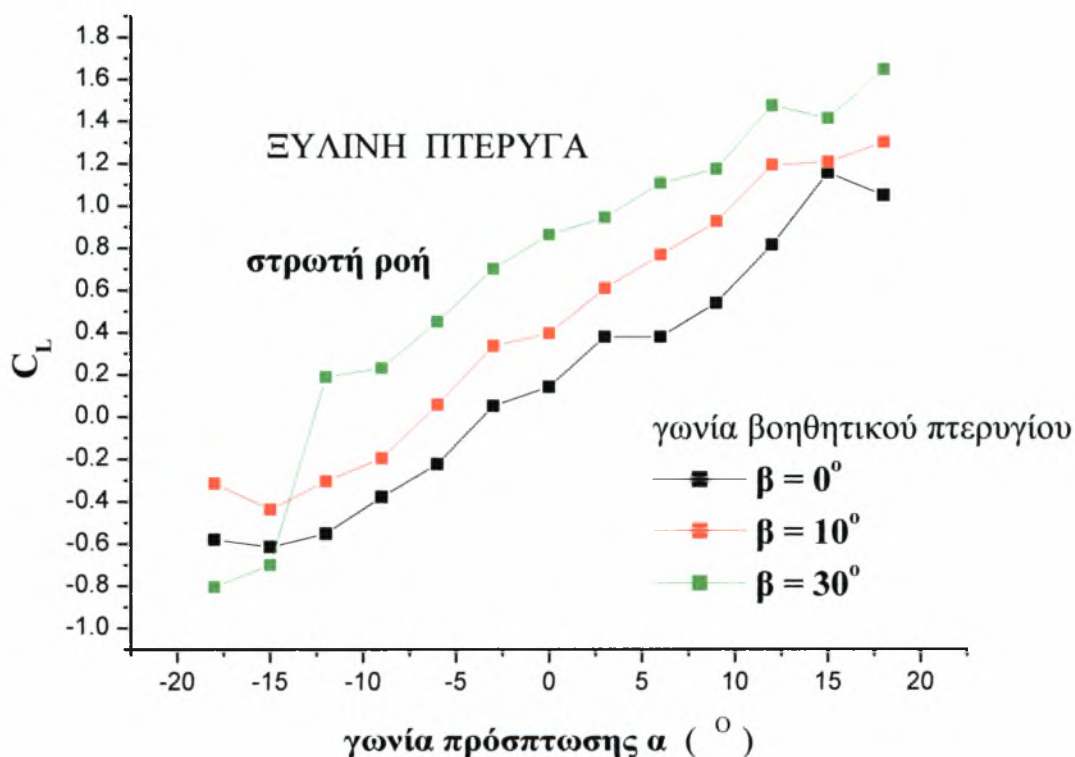
Όπως ήταν αναμενόμενο ‘επιβεβαιώνεται’ και πειραματικά η αναλογία του συντελεστή άνωσης με το τετράγωνο της ταχύτητας προσβολής. Όμως η κλίση του συντελεστή άνωσης φαίνεται ελαφρώς αυξημένη. Αυτό οφείλεται στην ελαστικότητα της πτέρυγας καθώς της επιτρέπει να παραμορφώνεται κατά τρόπο τέτοιο ώστε η γωνία προσβολής  $\alpha$  να αυξάνεται από τη θεωρητική στο σημείο πάκτωσης έως 1-2 μοίρες μεγαλύτερη στο κάθε ακροπτερύγιο. Επίσης φαίνεται καθαρά στα διαγράμματα η αύξηση της άνωσης καθώς αυξάνεται η γωνία προσβολής .

Ακόμη , βλέπουμε πως στην τυρβώδη ροή παρατηρούνται μεγαλύτερες συγκριτικά με τη στρωτή ροή τιμές συντελεστή άνωσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο τυρβώδες οριακό στρώμα το οποίο επιμηκύνει το σημείο , επομένως και το χρόνο αποκόλλησης της ροής στην πτέρυγα. Αυτό φάνηκε και πειραματικά κατά την απεικόνιση της ροής με καπνό.

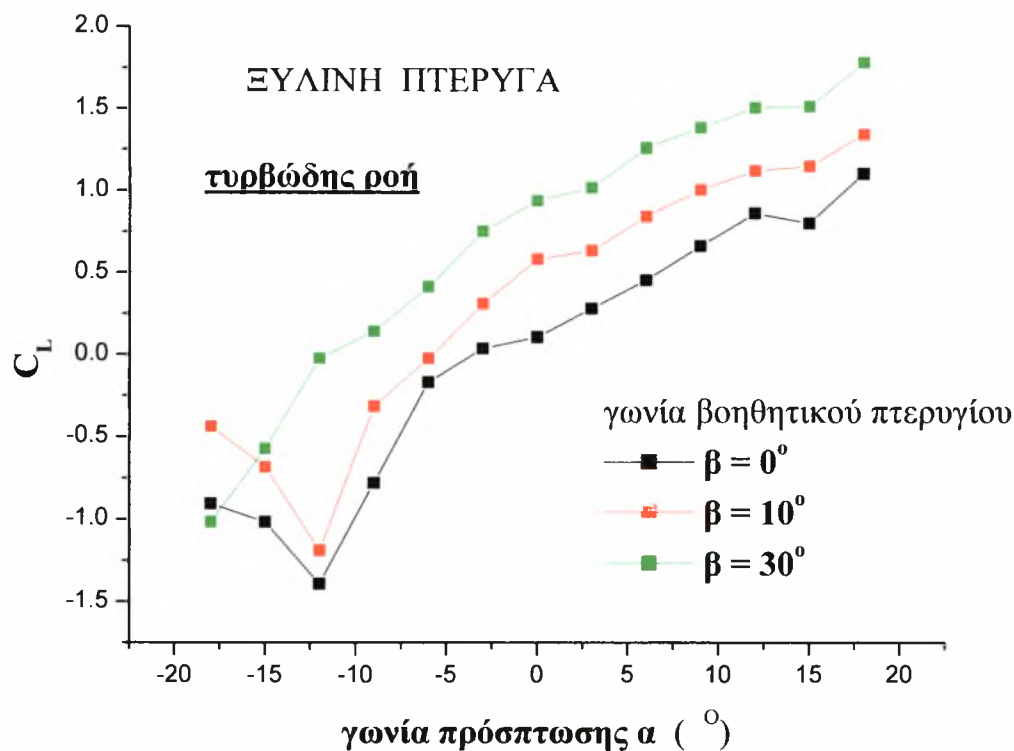
Τέλος , φαίνεται από το διάγραμμα ότι ακόμη και για γωνία προσβολής 0 μοίρες ο συντελεστής άνωσης ,λόγω της ασυμμετρίας της αεροτομής της πτέρυγας και γενικά της γεωμετρίας της είναι μεγαλύτερος του μηδενός.

### 5.2.2. Σταθερή πτέρυγα .

Οι μετρήσεις για τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή άνωσης στη σταθερή πτέρυγα έγιναν σε στρωτή και τυρβώδη ροή για αριθμούς Reynolds 134000 και 103000 αντίστοιχα , για γωνίες προσβολής από  $-18$  έως  $18$  μοίρες και για γωνίες βοηθητικού περυγίου  $\beta=0^\circ, 10^\circ, 30^\circ$ . Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων για το συντελεστή άνωσης .



Σχήμα 5.2.3



**Σχήμα 5.2.4**

### Σχόλια.

Στη σταθερή πτέρυγα οι πειραματικές τιμές του μέσου συντελεστή άνωσης, πάλι επιβεβαιώνουν το νόμο του τετραγώνου της ταχύτητας.

Επίσης γίνεται φανερή η επιρροή του βοηθητικού πτερυγίου στην ανωστική δύναμη, καθώς ανάλογα και με τη γωνία του επιφέρει αύξηση στο συντελεστή άνωσης έως και 55%. Για γωνίες βοηθητικού πτερυγίου 0 και 10 μοίρες παρατηρήθηκε αποκόλληση της ροής για γωνίες προσβολής -12, -15, -18 μοίρες με άμεσο αντίκτυπο στην τιμή του μέσου συντελεστή άνωσης (απότομη αύξηση, ανώ αναμενόταν μείωση).

Κλείνοντας, και σ' αυτή την πτέρυγα στη τυρβώδη ροή μετρήθηκαν μεγαλύτεροι συντελεστές άνωσης (κατά απόλυτη τιμή) συγκριτικά με τη στρωτή ροή για τους ίδιους λόγους με την ελαστική πτέρυγα.

### 5.3. Αποτελέσματα οπτικοποίησης.

#### Οπτική ανάλυση της ταλάντωσης στην ελαστική πτέρυγα.

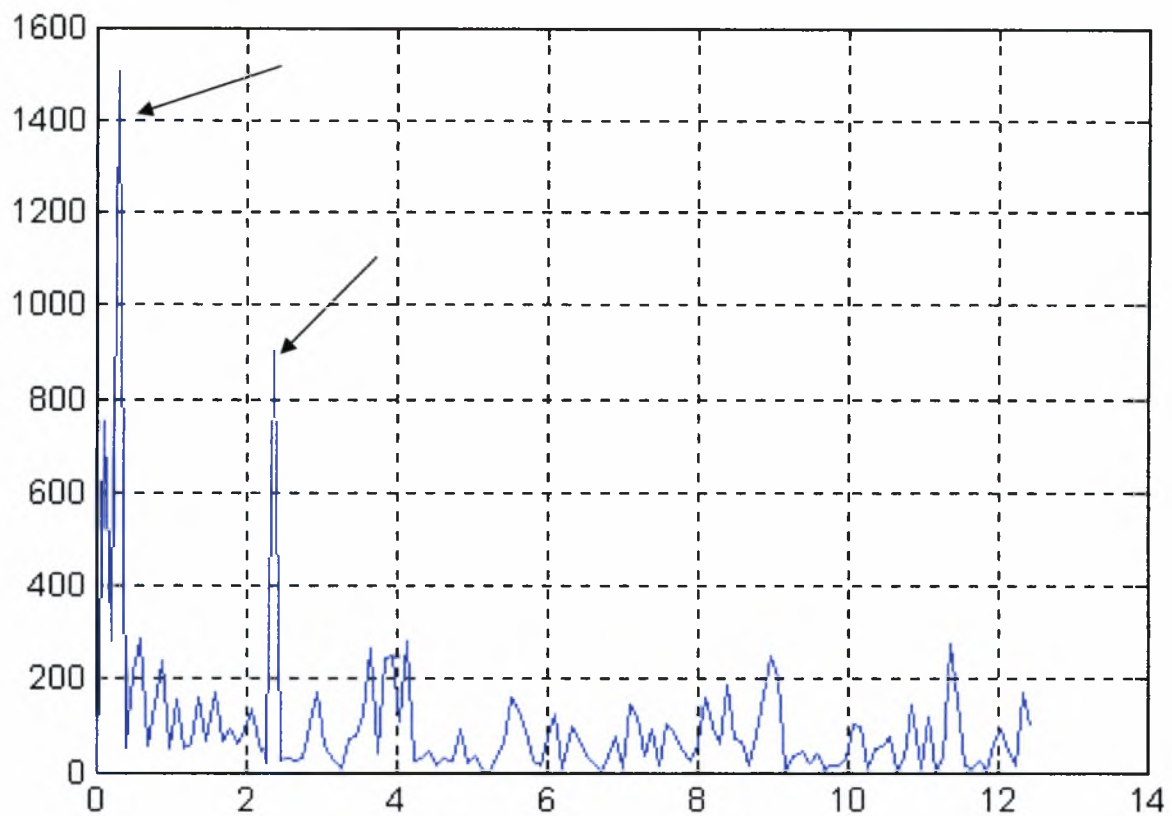
Η οπτική ανάλυση της ταλάντωσης της ελαστικής πτέρυγας έγινε με τη βοήθεια προγραμμάτων **Matlab**. Μέσω αυτών των προγραμμάτων επεξεργαστήκαμε την βιντεοσκοπημένη κίνηση σταθερού σημείου αναφοράς πάνω στα ακροπερύγια και βρήκαμε τα φάσματα των επιταχύνσεων και μετατοπίσεων σε αυτό το σημείο. Ο σκοπός αυτής της επιπρόσθετης ανάλυσης ήταν να επιβεβαιώσει τα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς με αυτό τον τρόπο μετράμε απευθείας μετατόπιση ενώ με τα επιταχυνσιόμετρα μετράμε επιταχύνσεις. Η παραπάνω ανάλυση έγινε σε περιορισμένο εύρος συχνοτήτων (έως 25 Hz). Αυτός ο περιορισμός τέθηκε εκ των πραγμάτων επειδή αυτή ήταν και η συχνότητα βιντεοσκόπησης της βιντεοκάμερας (25 frames/second). Έτσι γίνεται δυσχερής η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με αυτά από τα επιταχυνσιόμετρα, τα οποία ανάλυσαν πολλαπλάσιες συχνότητες της τάξης των 1000 Hz.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της οπτικής ανάλυσης της ταλάντωσης της ελαστικής πτέρυγας.

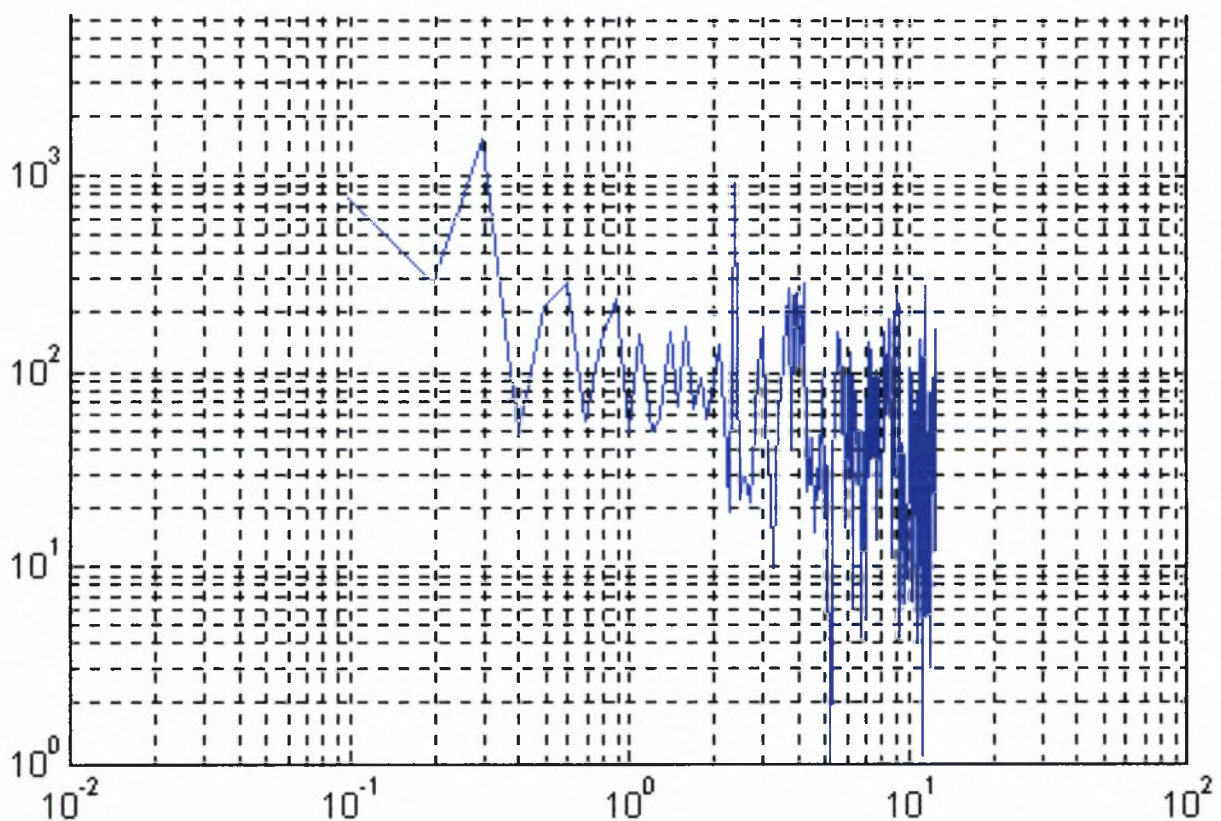
#### 5.3.1 Φάσματα ισχύος της μετατόπισης – ταλάντωσης.

Στον οριζόντιο άξονα αναγράφεται η συχνότητα και στον κατακόρυφο το φάσμα ισχύος της ταλάντωσης. Παράλληλα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα σε λογαριθμική κλίμακα. Όπως θα προκύψει και από αυτή την ανάλυση παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην ταλάντωση ανάμεσα στη στρωτή και την τυρβώδη ροή, κάτι βέβαια αναμενόμενο. Οι κύριες διαφορές εντοπίζονται στην ένταση, καθώς στην τυρβώδη ροή είναι κατά πολύ μεγαλύτερη και οι παραμορφώσεις της πτέρυγας αντίστοιχα μεγαλύτερες, και στο εύρος των συχνοτήτων το οποίο στην τυρβώδη ροή είναι πραγματικά πολύ μεγάλο.

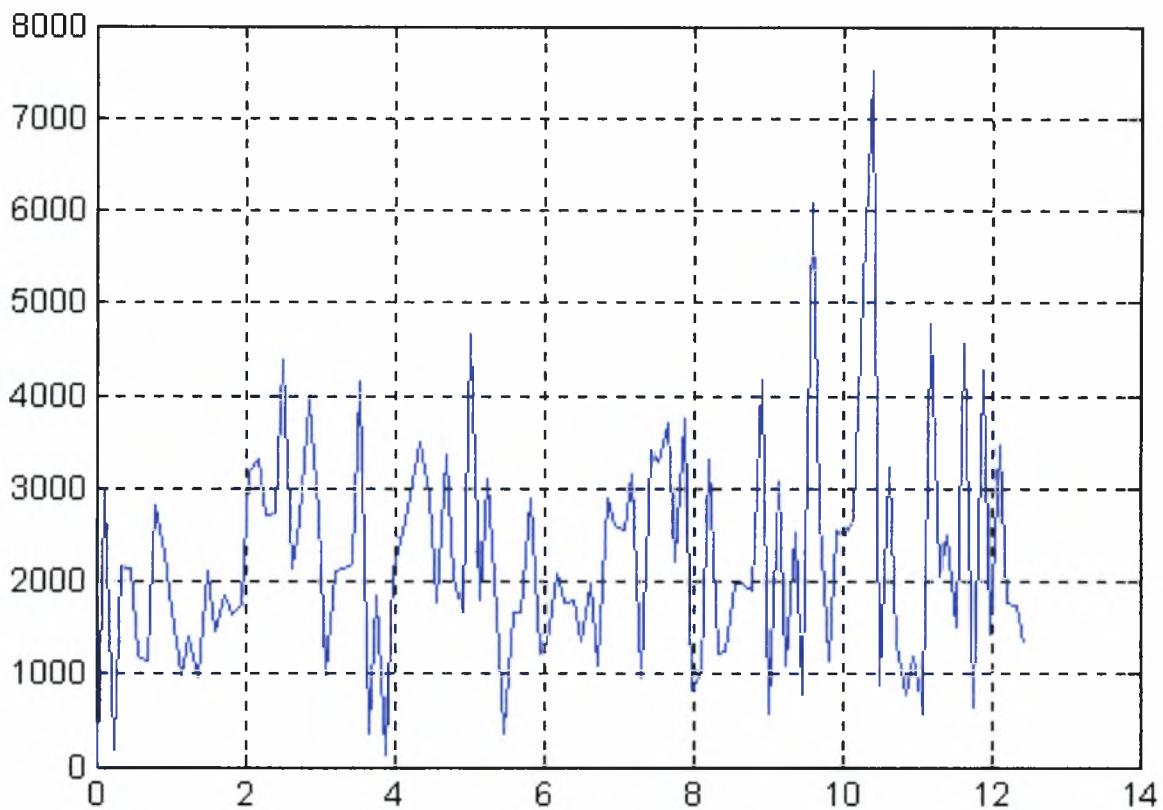




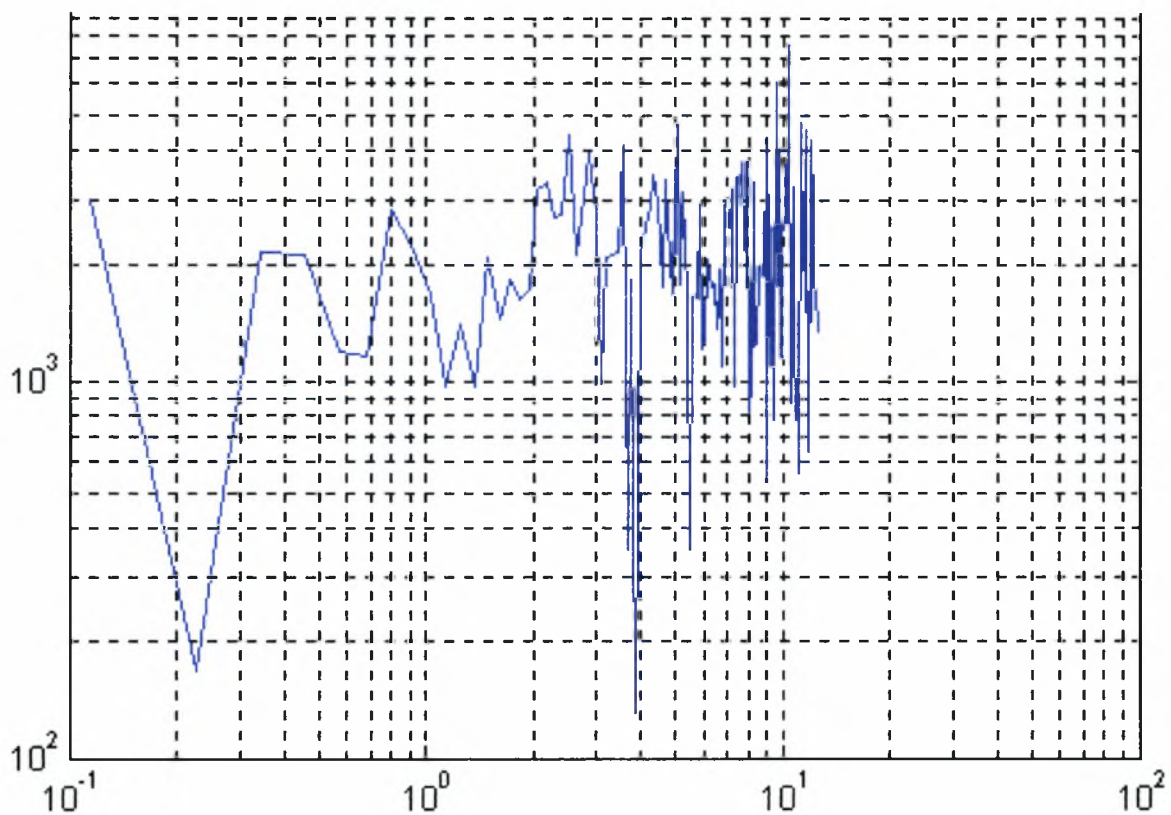
**Σχήμα 5.3.1.1. Φάσμα ισχύος στρωτή ροή ,  $U_m=10.1$  m/s,  $\alpha=18^\circ$ .**



**Σχήμα 5.3.1.2  $U_m=10.1$  m/s,  $\alpha=18^\circ$  λογαριθμική κλίμακα.**

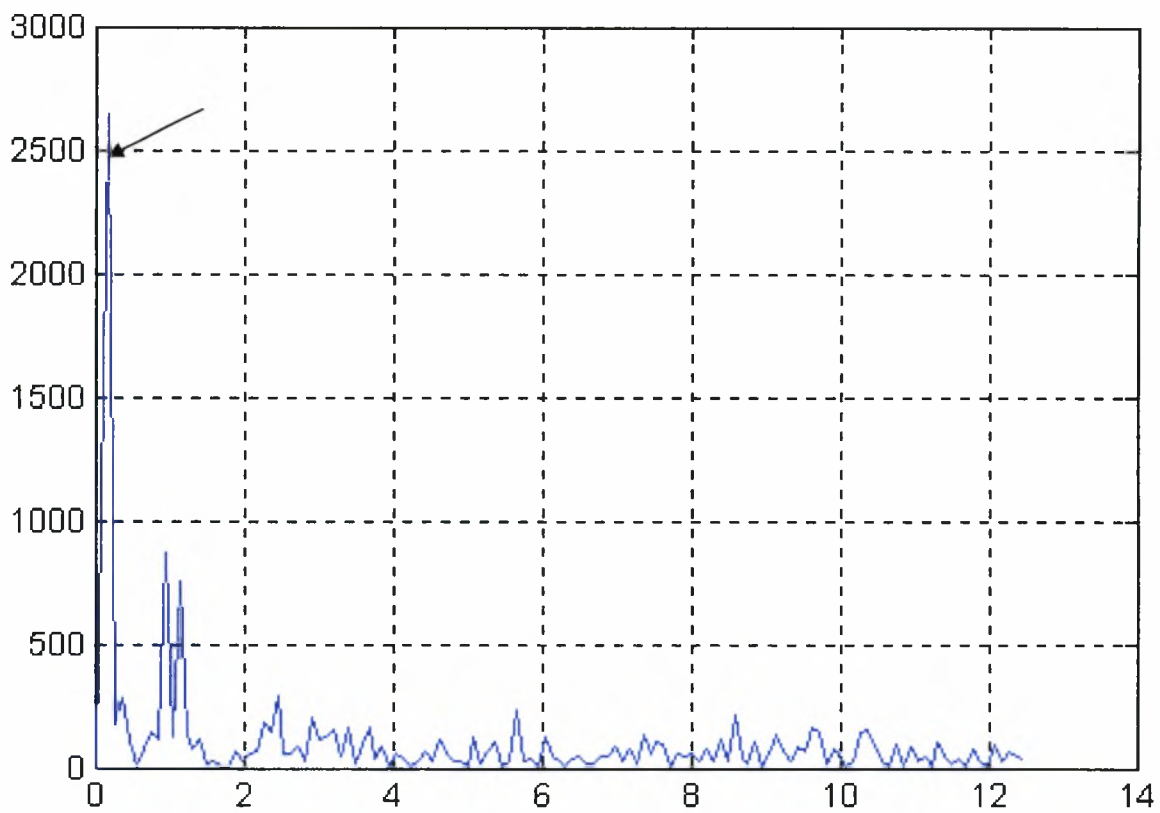


**Σχήμα 5.3.1.3 Τυρβώδης ροή  $U_m=10.1$  m/s ,  $\alpha=18^\circ$ .**

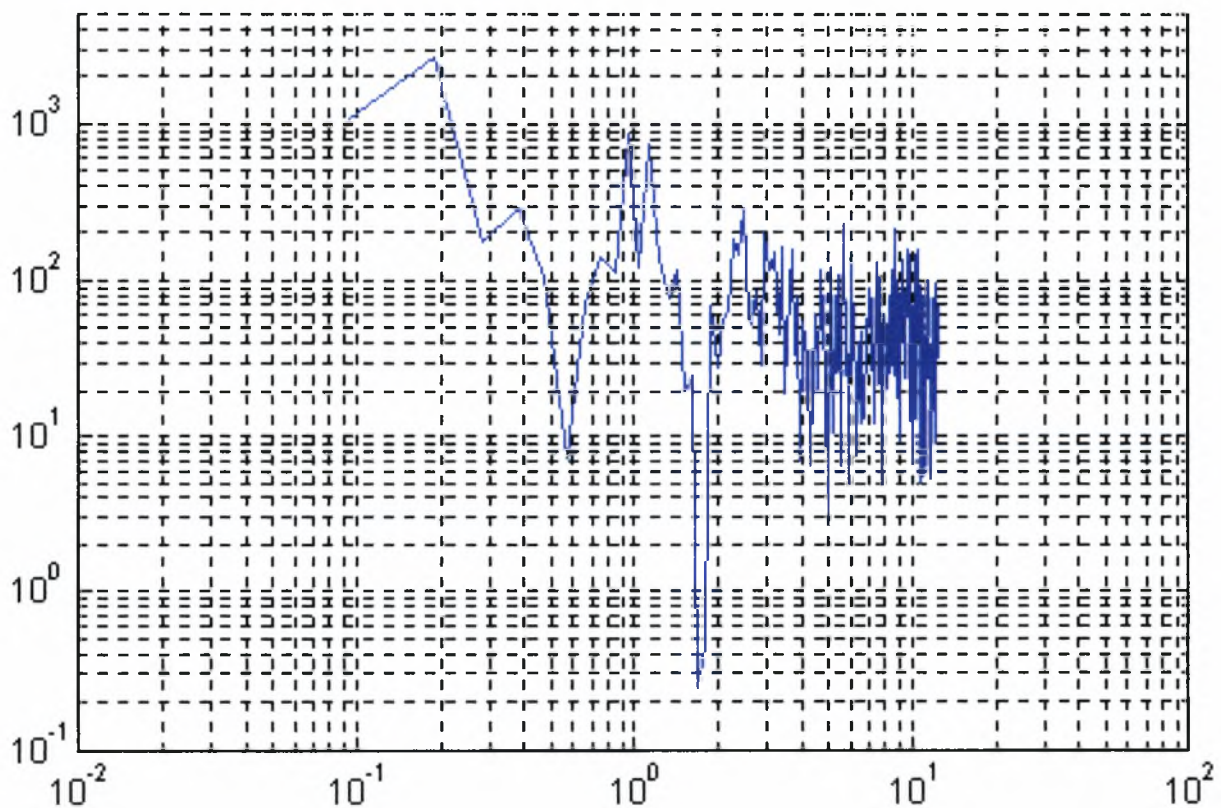


**Σχήμα 5.3.1.4  $U_m=10.1$  m/s ,  $\alpha=18^\circ$  ,λογαριθμική κλίμακα.**

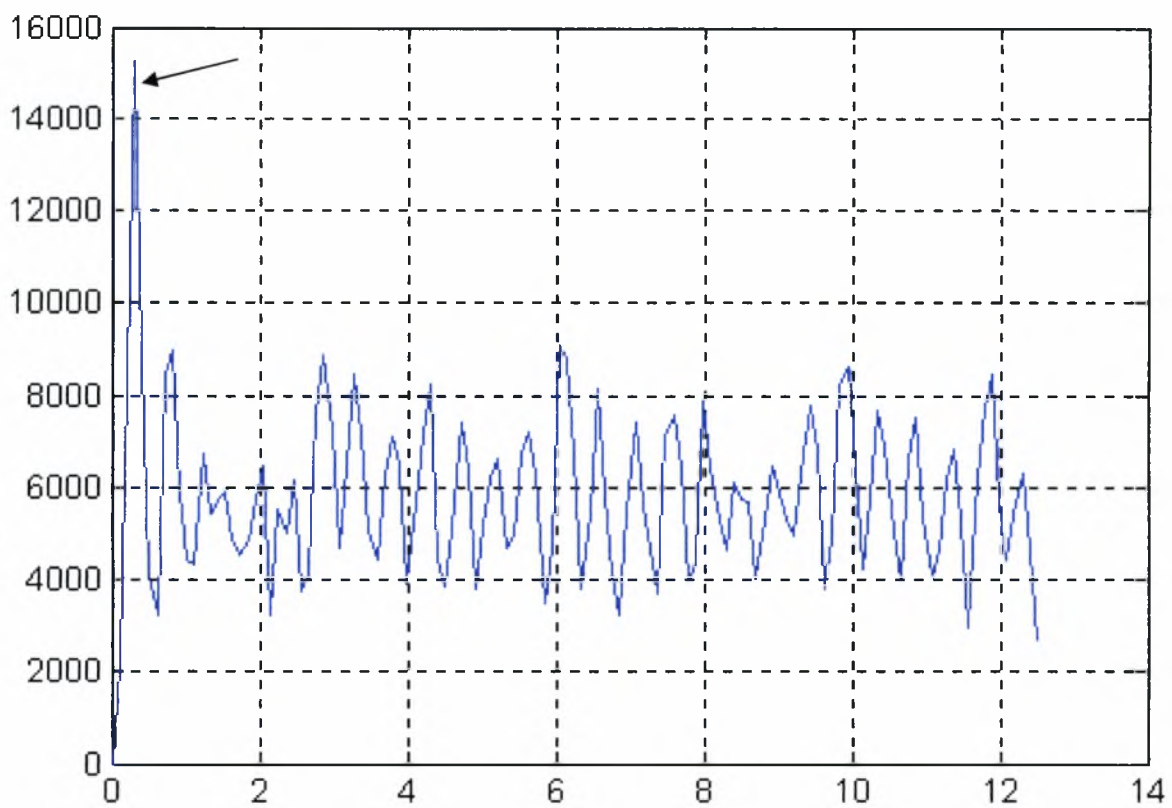




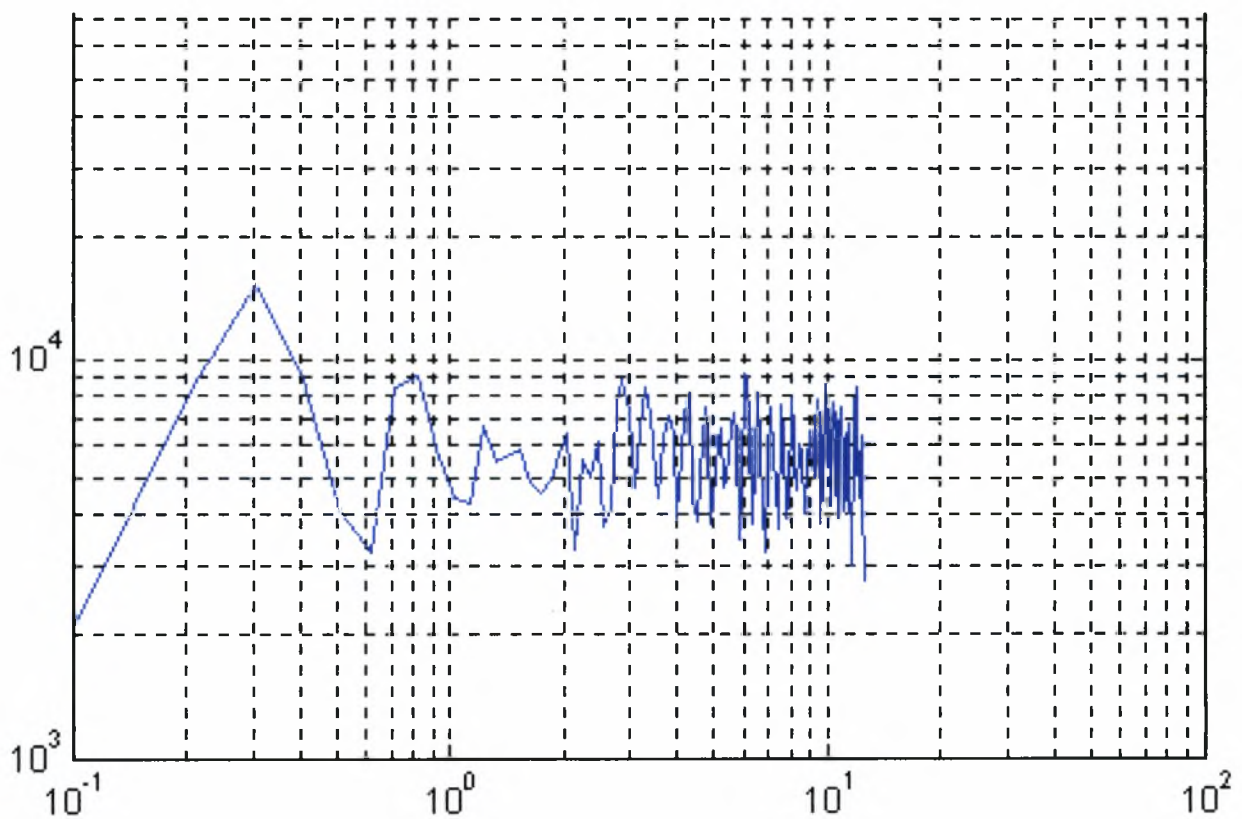
**Σχήμα 5.3.1.5 Στρωτή ροή ,  $U_m=10.1$  m/s,  $\alpha=-18^\circ$ .**



**Σχήμα 5.3.1.6  $U_m=10.1$  m/s,  $\alpha=-18^\circ$ , λογαριθμική κλίμακα.**



**Σχήμα 5.3.1.7 Τυρβώδης ροή  $U_m=10.1$  m/s ,  $\alpha=-18^\circ$ .**



**Σχήμα 5.3.1.8  $U_m=10.1$  m/s ,  $\alpha=-18^\circ$  λογαριθμική κλίμακα**

## Σχόλια.

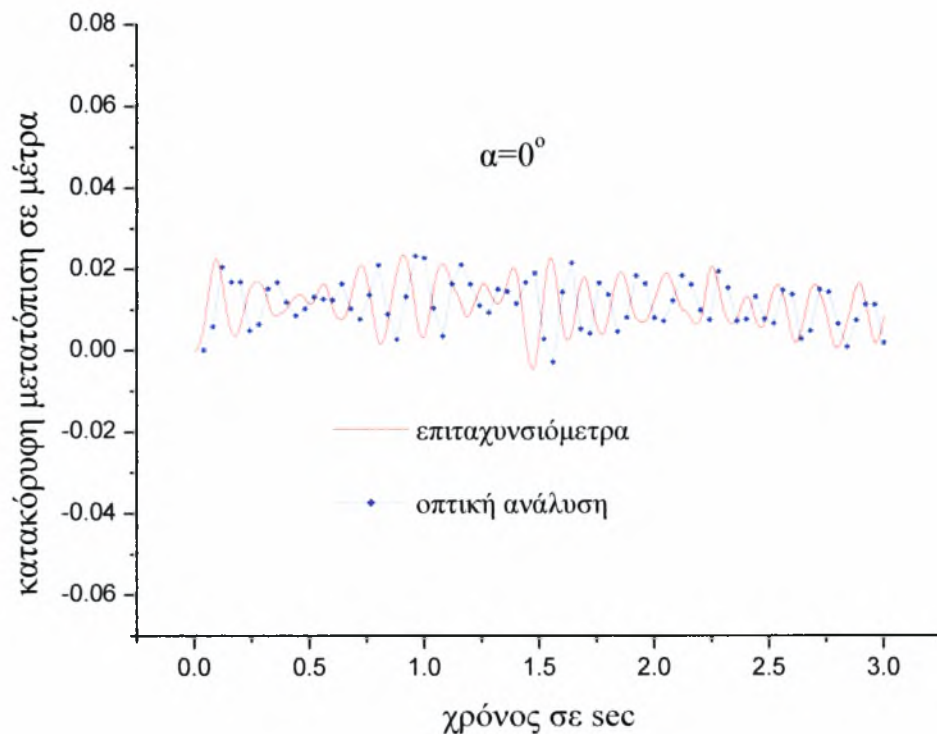
Όπως είπαμε και πιο πάνω , μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της οπτικοποίησης της ταλάντωσης της ελαστικής πτέρυγας με αυτά από τα επιταχυνσιόμετρα είναι πολύ δύσκολη λόγω της μικρής συχνότητας δειγματοληψίας της βιντεοκάμερας.

Όμως ,έστω και σ' αυτό το συγκριτικά μικρό εύρος συχνοτήτων είναι ευδιάκριτη η ιδιοσυχνότητα του υλικού της πτέρυγας στα 0.5 Hz (βελάκι στο σχήμα 5.3.1.1) και στα 2.3 Hz περίπου .

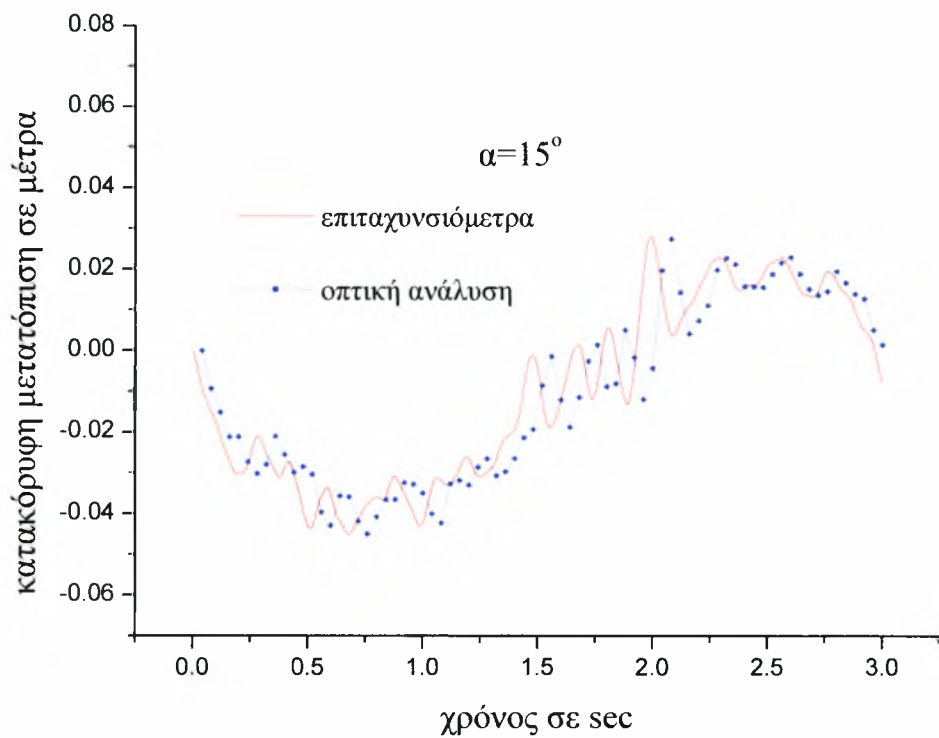
### 5.3.2. Μετατοπίσεις στον κατακόρυφο άξονα .

Ο οπτικός προσδιορισμός της κατακόρυφης μετατόπισης του ακροπερυγίου έγινε με ανάλυση της βιντεοσκοπημένης εικόνας από ειδικό πρόγραμμα **matlab**. Με τη βοήθεια αυτού του προγράμματος προσδιορίζαμε τη θέση ενός σημείου του ακροπερυγίου κατάλληλα χρωματισμένου σε χρονικό διάστημα 1/25 sec (δηλαδή 1 δια την συχνότητα φωτογράφισης της βιντεοκάμερας).

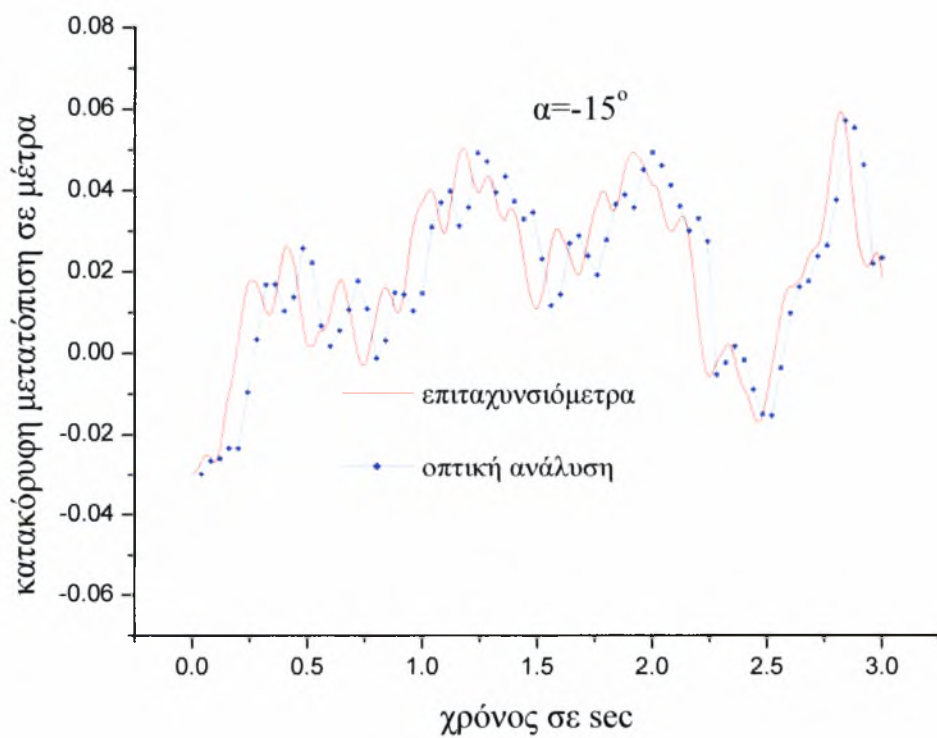
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης για τρεις γωνίες προσβολής σε τυρβώδη ροή και ταχύτητα 10 m/s και γίνεται άμεσα σύγκριση με τα πειραματικά.



Σχήμα 5.3.2.1



**Σχήμα 5.3.2.2**



**Σχήμα 5.3.2.3**

## Σχόλια .

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνονται με τελείες τα αποτελέσματα της οπτικής ανάλυσης και με συνεχείς γραμμές αυτά της πειραματικής. Και στις δύο περιπτώσεις φαίνονται παραπλήσια τα χαρακτηριστικά της ταλάντωσης ( εύρος , συχνότητες ) στα όρια του ανεκτού σφάλματος.

Ο άξονας του χρόνου δείχνει χρονική διάρκεια και όχι πραγματικό χρόνο , αφού οι δύο μετρήσεις λήφθηκαν εταιροχρονισμένα.



#### 5.4. Πειραματική μέτρηση της ταλάντωσης των ακροπερυγίων της ελαστικής πτέρυγας.

Η πειραματική μέτρηση της μετατοπίσεως των ακροπερυγίων της ελαστικής πτέρυγας έγινε με τη βοήθεια δύο πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιομέτρων τα οποία τοποθετήθηκαν στα ακροπερύγια. Το βάρος των δύο αυτών επιταχυνσιομέτρων καθώς και η επίδρασή τους στη ροή θεωρήθηκαν αμελητέα συγκριτικά με τα πειραματικά μετρήσιμα μεγέθη.

Τα δύο αυτά επιταχυνσιόμετρα με τη βοήθεια του προγράμματος Labview και των κατάλληλων παραμέτρων, οι οποίες καθορίζονταν από τα στοιχεία του καθενός, μας έδιναν τιμές στιγμιαίας επιτάχυνσης στα δύο ακροπερύγια. Η συχνότητα δειγματοληψίας καθορίστηκε στις 1000 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο.

Οι τιμές που παίρναμε αποθηκεύονταν σε αρχεία όπου ύστερα με αριθμητική ολοκλήρωση με τη βοήθεια προγράμματος Fortran παράγαμε τιμές στιγμιαίας μετατόπισης.

##### 5.4.1 Αριθμητική ολοκλήρωση στιγμιαίων επιταχύνσεων.

Έχοντας τις στιγμιαίες επιταχύνσεις και βάσει της μεθόδου του τραπεζίου (είναι μια μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης):

$$U(t) - U(0) = \sum \frac{a_i + a_{i+1}}{2} * dt$$

προσδιορίζουμε τη στιγμιαία ταχύτητα  $U(t)$ . Ολοκληρώνοντας με την ίδια μέθοδο άλλη μια φορά τελικά παίρνουμε στιγμιαία θέση του αντίστοιχου ακροπερυγίου ως προς τον άξονα  $z$ . Η τελική έκφραση είναι:

$$z(t) - z(0) = \sum \frac{u_i + u_{i+1}}{2} * dt + U(0) * t$$

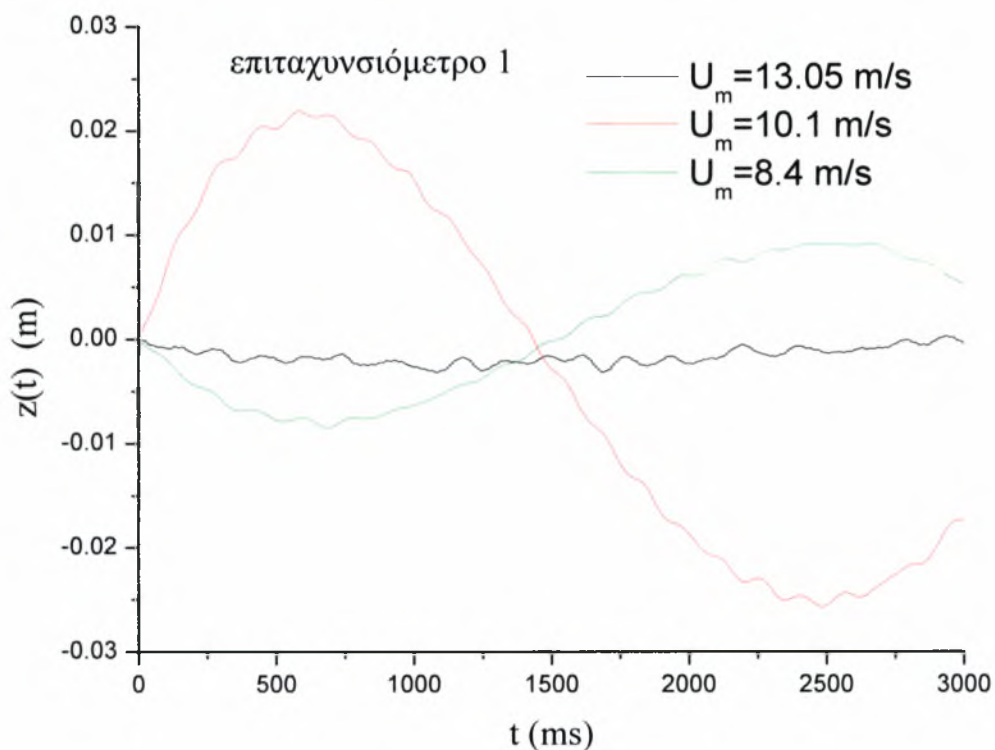
όπου  $a_i$ ,  $u_i$ , η μετρηθείσα τιμή της επιτάχυνσης και αντίστοιχα ταχύτητας τη χρονική στιγμή  $i$ .

Οι σταθερές της ολοκλήρωσης προκύπτουν από τις αρχικές συνθήκες. Η αρχική ταχύτητα ( $U(0)$ ) είναι ίση με μηδέν ενώ η αρχική θέση  $z(0)$  ορίζεται κατά περίπτωση σαν η απόσταση από το σημείο  $z=0$

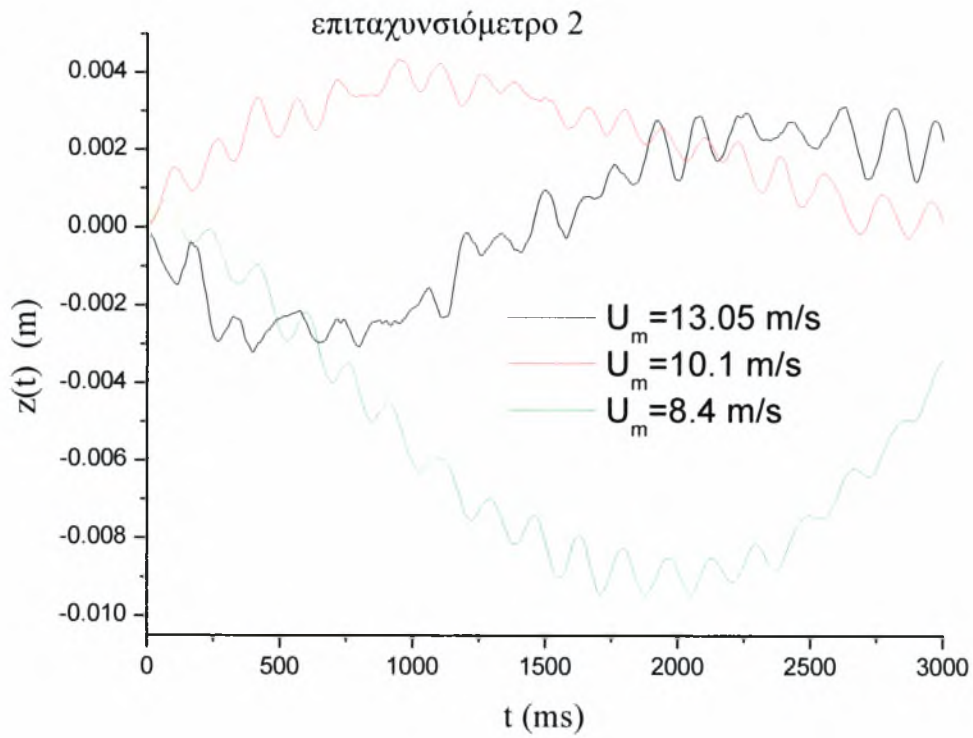
Τα αποτελέσματα της παραπάνω επεξεργασίας παριστάνονται , για στρωτή και τυρβώδη ροή , γραφικά στα παρακάτω διαγράμματα χρόνου – θέσης του ακροπερυγίου. Ο χρόνος εκφράζεται σε msec και η μετατόπιση σε μέτρα από τη θέση 0.

#### A) Στρωτή ροή.

- ♦ Σταθερό  $\alpha=0^\circ$ .

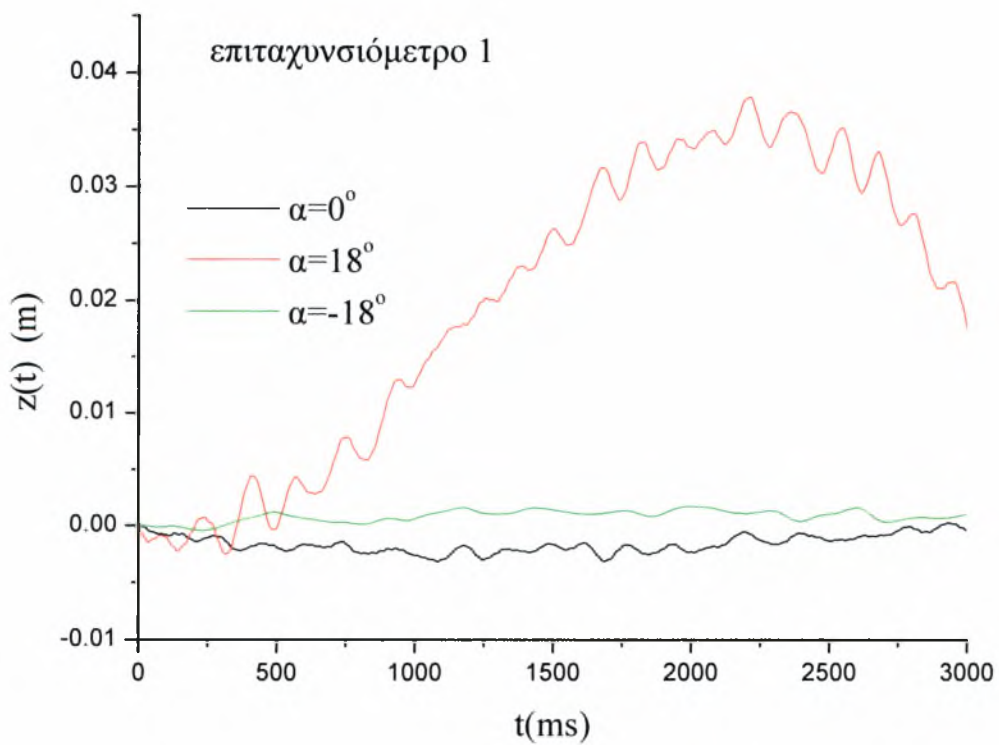


Σχήμα 5.4.1

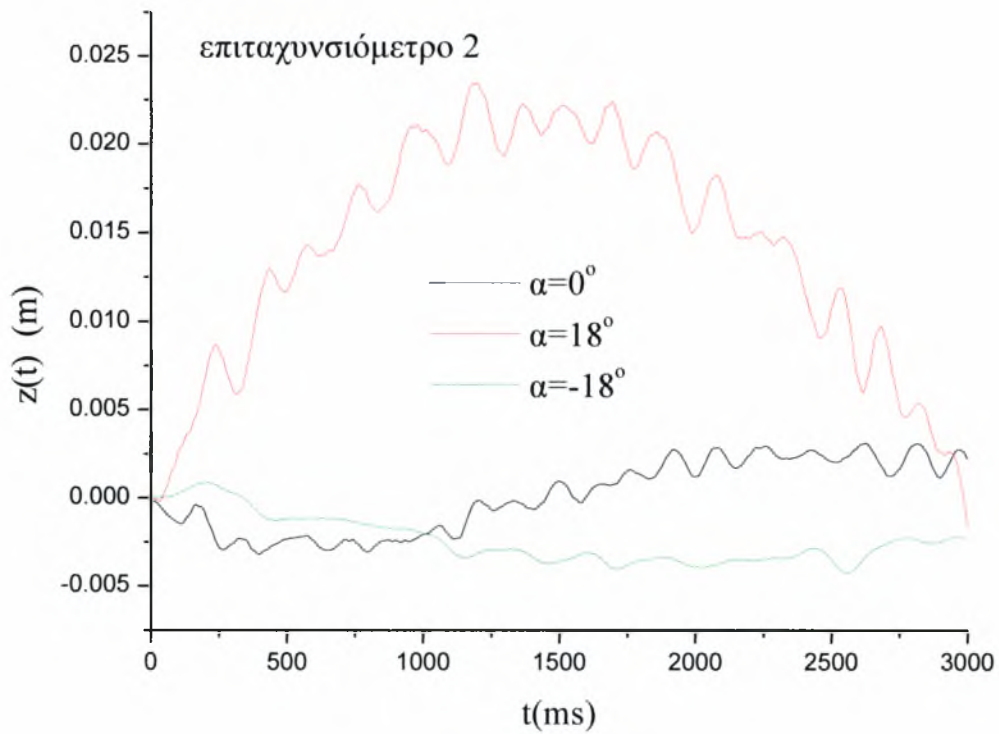


**Σχήμα 5.4.2**

♦ Σταθερή ταχύτητα  $U_m = 13.05 \text{ m/s}$ .

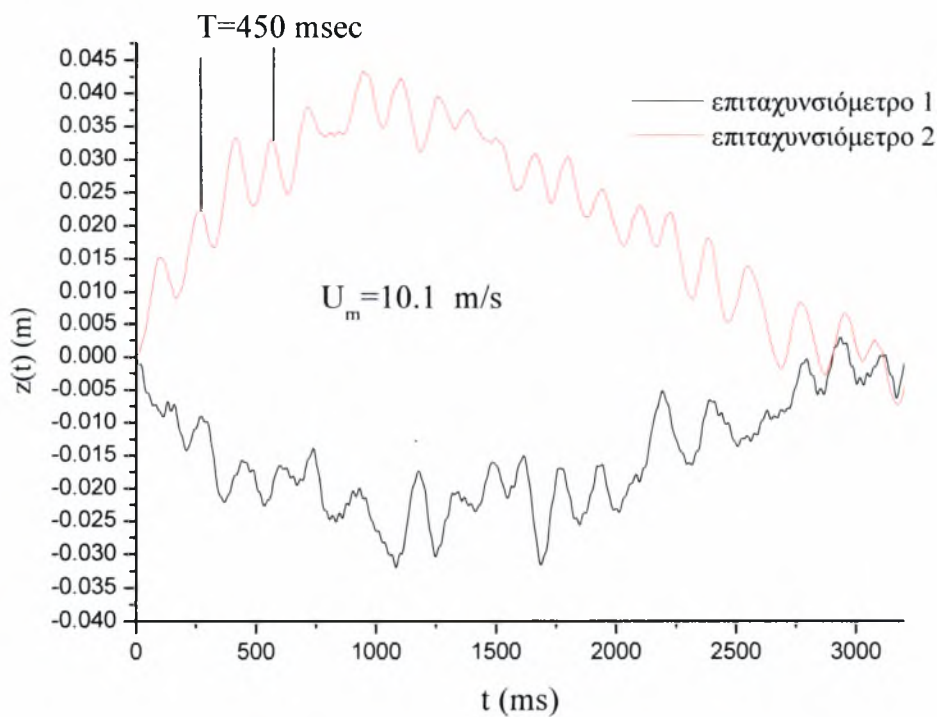


**Σχήμα 5.4.3**



**Σχήμα 5.4.4**

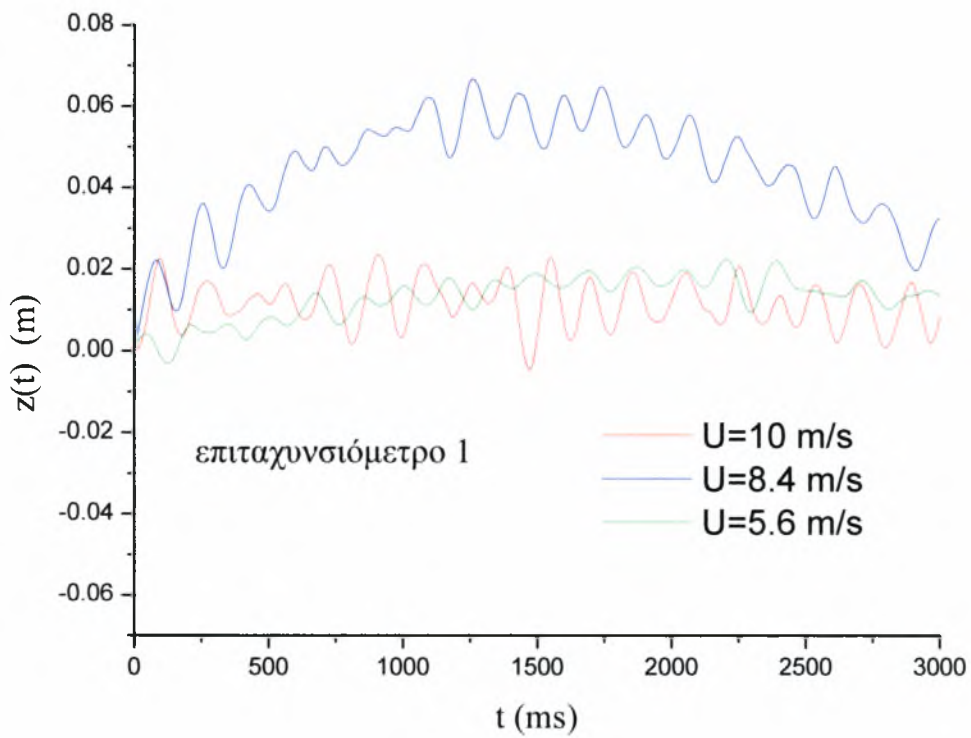
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται παραστατικά η διαφορά φάσης στα δύο επιταχυνσιόμετρα , σε μέση ταχύτητα ροής 10 m/s .



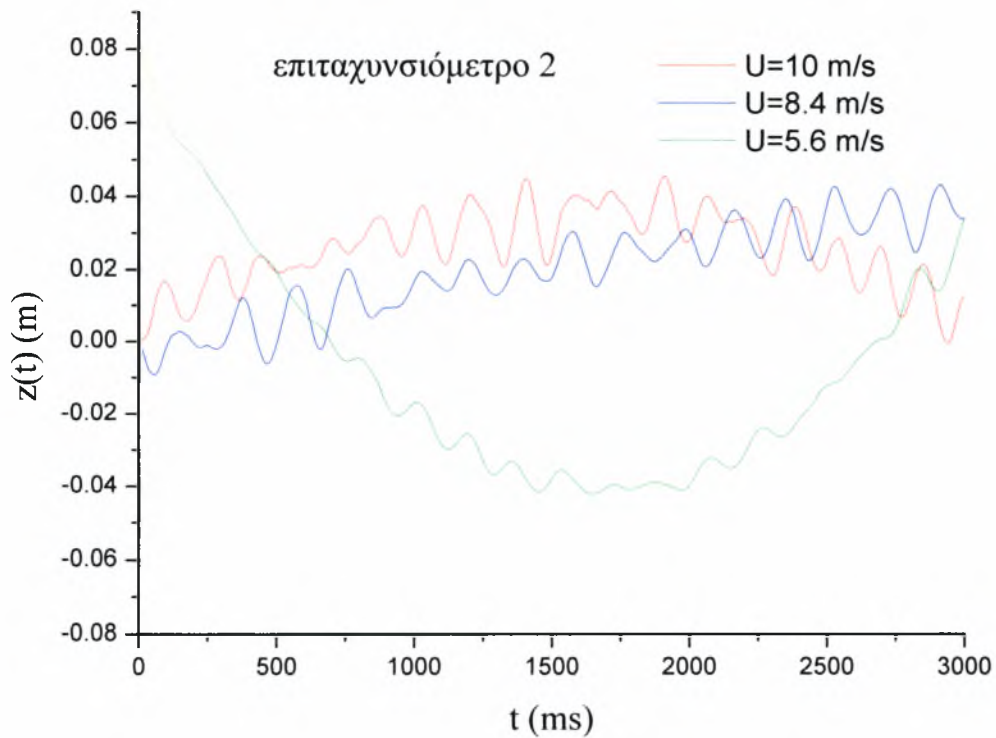
**Σχήμα 5.4.5**

## B) Τυρβώδης ροή.

♦ Σε σταθερή γωνία πρόσπτωσης  $\alpha=0^\circ$ .



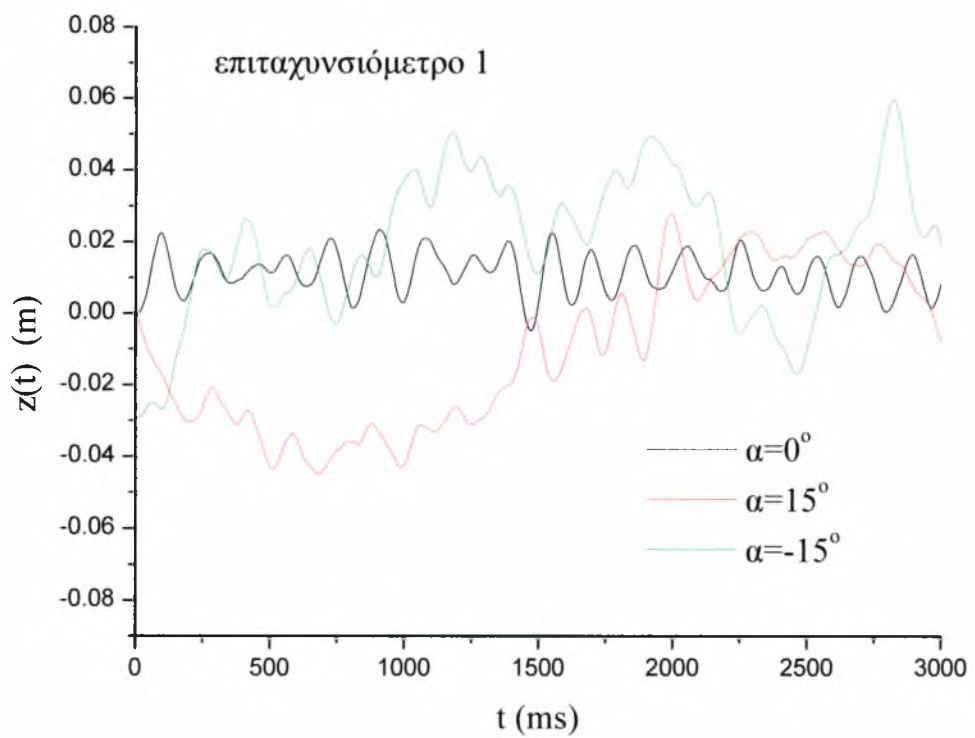
Σχήμα 5.4.6



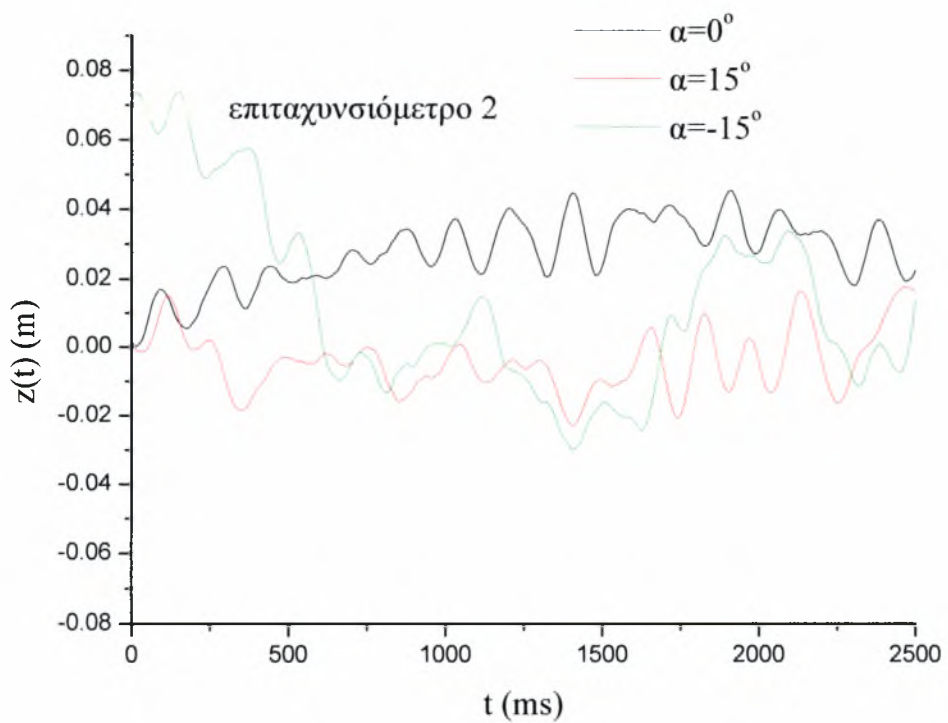
Σχήμα 5.4.7



◆ Σε σταθερή ταχύτητα  $U_m=10.1\text{ m/s}$ .



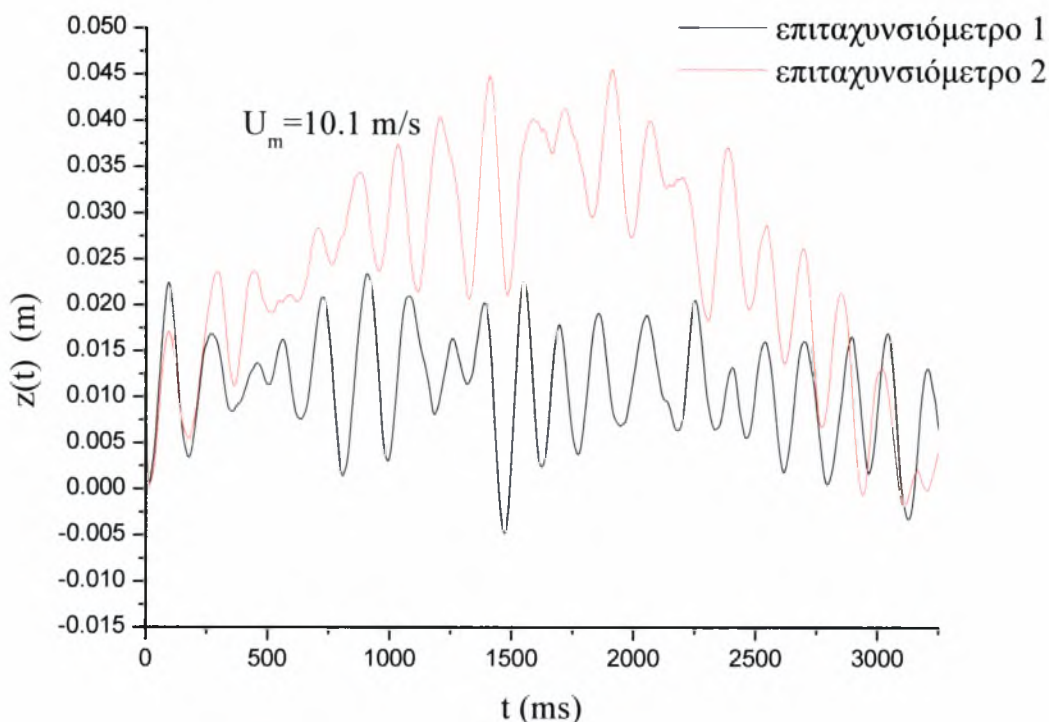
Σχήμα 5.4.8



Σχήμα 5.4.9



Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται παραστατικά η διαφορά φάσης στα δύο επιταχυνσιόμετρα , σε μέση ταχύτητα ροής 10 m/s .



**Σχήμα 5.4.10**

### **Σχόλια.**

Όπως ήταν αναμενόμενο η ταλάντωση είναι εντονότερη στην τυρβώδη ροή .

Το μέγιστο εύρος ταλάντωσης παρουσιάζεται στην τυρβώδη ροή για μέση ταχύτητα 10.1 m/s και γωνία πρόσπτωσης  $-15$  μοίρες και είναι ίσο με 40 mm.

Εμφανίζεται μια διαφορά φάσης ανάμεσα στα δύο επιταχυνσιόμετρα η οποία είναι εντονότερη στη στρωτή ροή. Η διαφορά αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα δύο ακροπερύγια της ελαστικής πτέρυγας δέχονται αντίρροπες ανωστικές δυνάμεις . Αντίθετα , στην τυρβώδη ροή φαίνεται ότι οι αντίστοιχες δυνάμεις είναι ομόρροπες στα δύο άκρα της πτέρυγας.

Τέλος είναι φανερή μια περίοδος της τάξης των 0.450 δευτερολέπτων (σχήμα 5.4.5) που χαρακτηρίζει την ταλάντωση της πτέρυγας ( συχνότητα 2.25 Hz).

### 5.4.2 Στατιστική ανάλυση ενδείξεων των επιταχυνσιομέτρων.

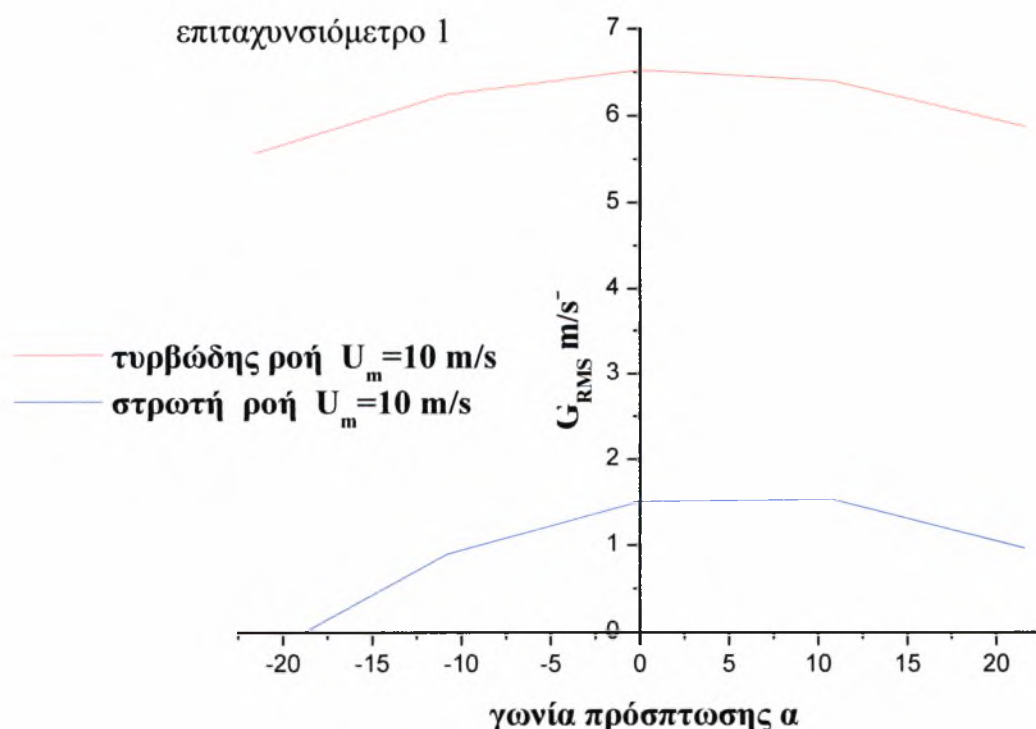
Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται μια στατιστική ανάλυση των μετρήσεων από τα επιταχυνσιόμετρα. Εξετάζεται η μέση τυπική απόκλιση συναρτήσει της γωνίας προσβολής και ο συντελεστής συσχέτισης των ενδείξεων επιταχυνσιομέτρου 1 και 2 συναρτήσει της γωνίας προσβολής.

Ο συντελεστής συσχέτισης  $R$  είναι ένα στατιστικό μέγεθος το οποίο ορίζεται ως :

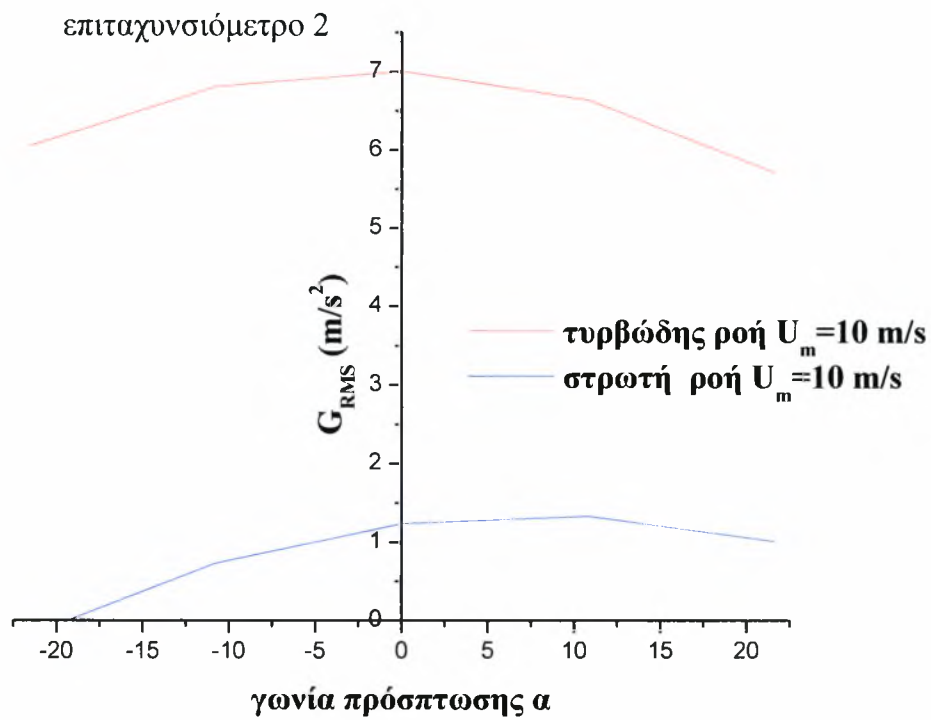
$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (a1 * a2)}{n \cdot rms1 * rms2}$$

όπου ,  $a1$  και  $a2$  οι ενδείξεις των επιταχυνσιομέτρων 1 και 2 αντίστοιχα και  $rms1$  και  $rms2$  οι αντίστοιχες μέσες τετραγωνικές αποκλίσεις.

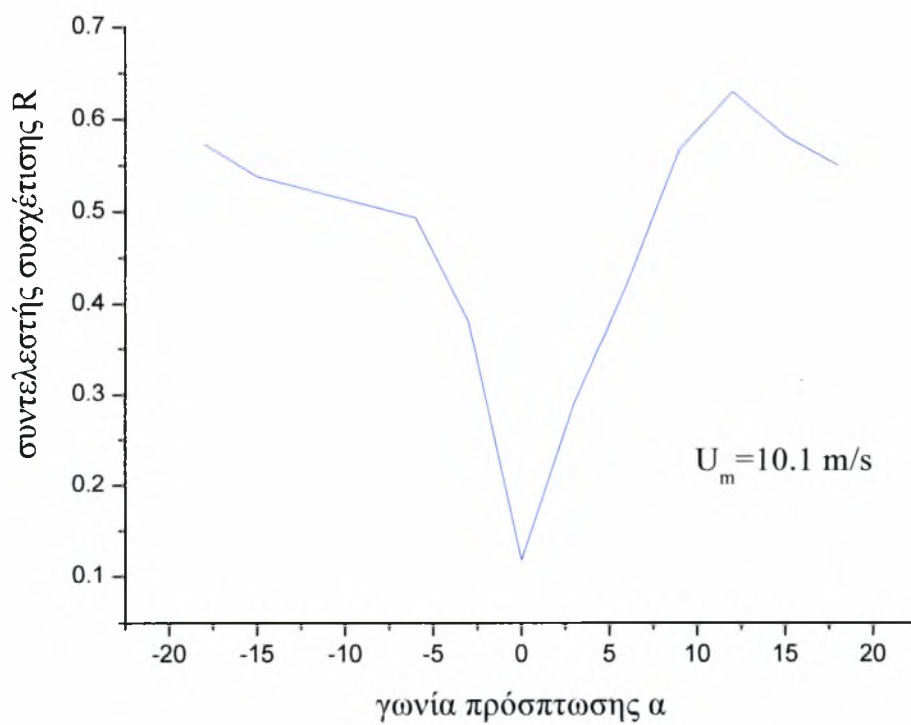
Ο συντελεστής συσχέτισης  $R$  παίρνει τιμές μεταξύ -1 και 1 και εκφράζει το μέτρο της συμμεταβλητικότητας μεταξύ δύο μεταβλητών.



Σχήμα 5.4.11



Σχήμα 5.4.12



Σχήμα 5.4.13

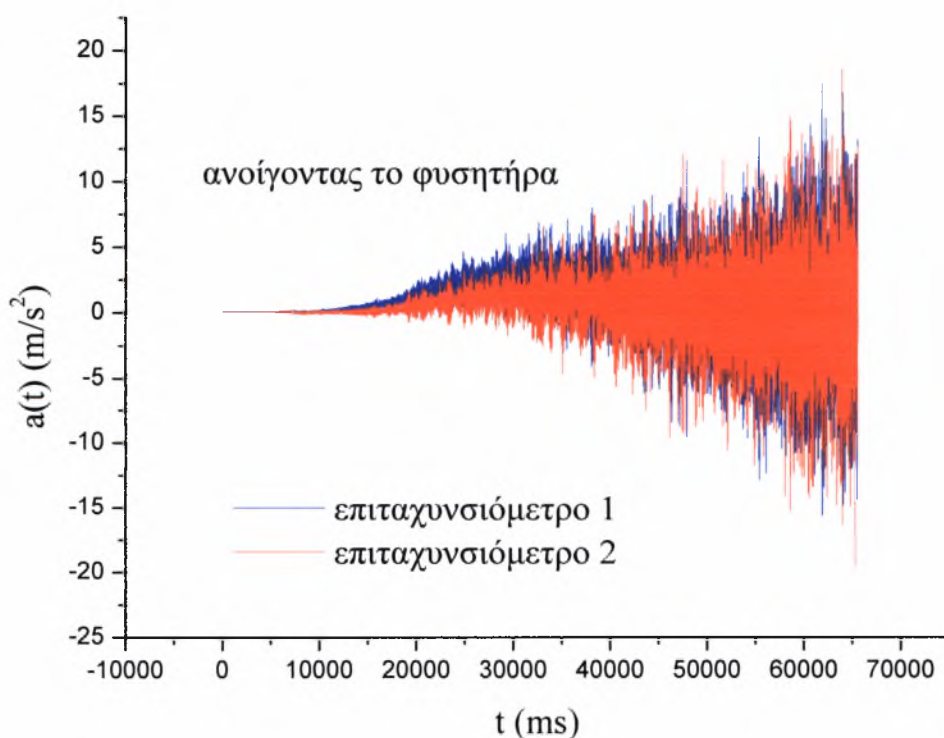
## Σχόλια.

Η μέση τυπική απόκλιση των μετρήσεων όπως είναι αναμενόμενο είναι πολύ μεγαλύτερη στην τυρβώδη ροή όπου οι αστάθειες είναι μεγάλες.

Ο συντελεστής συσχέτισης των δύο επιταχυνσιομέτρων είναι πολύ μικρός στις μικρές γωνίες προσβολής και φτάνει την τιμή 0.65 στις γωνίες  $-18$  και  $18$  μοίρες . Αυτό σημαίνει μεγάλες διαφορές μεταξύ των μετρηθείσων επιταχύνσεων ανάμεσα στα δύο ακροπτερυγα για μικρές (μικρή συσχέτιση ) και μικρότερες στις μεγάλες (κατά απόλυτη τιμή ) γωνίες προσβολής (καλύτερη συσχέτιση – παρόμοιες τιμές).

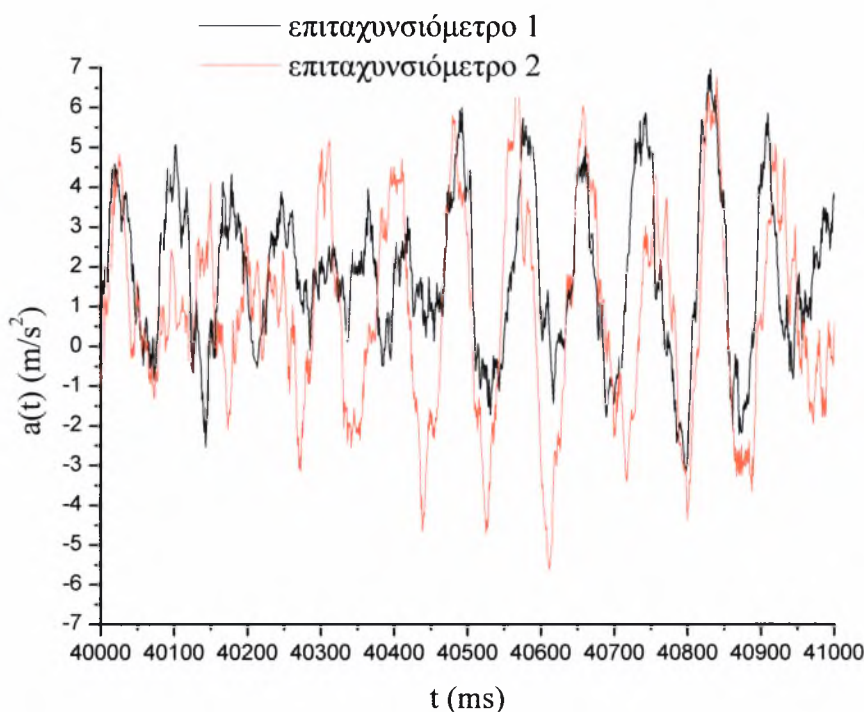
### 5.4.3 Μεταβατικό φαινόμενο.

Στα παρακάτω διαγράμματα παριστάνονται γραφικά οι ενδείξεις των επιταχυνσιομέτρων ξεκινώντας και κλείνοντας το φυσητήρα της αεροσήραγγας (μεταβατικό φαινόμενο). Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι  $1000\text{ s}^{-1}$  και ο συνολικός χρόνος 65 δευτερόλεπτα.

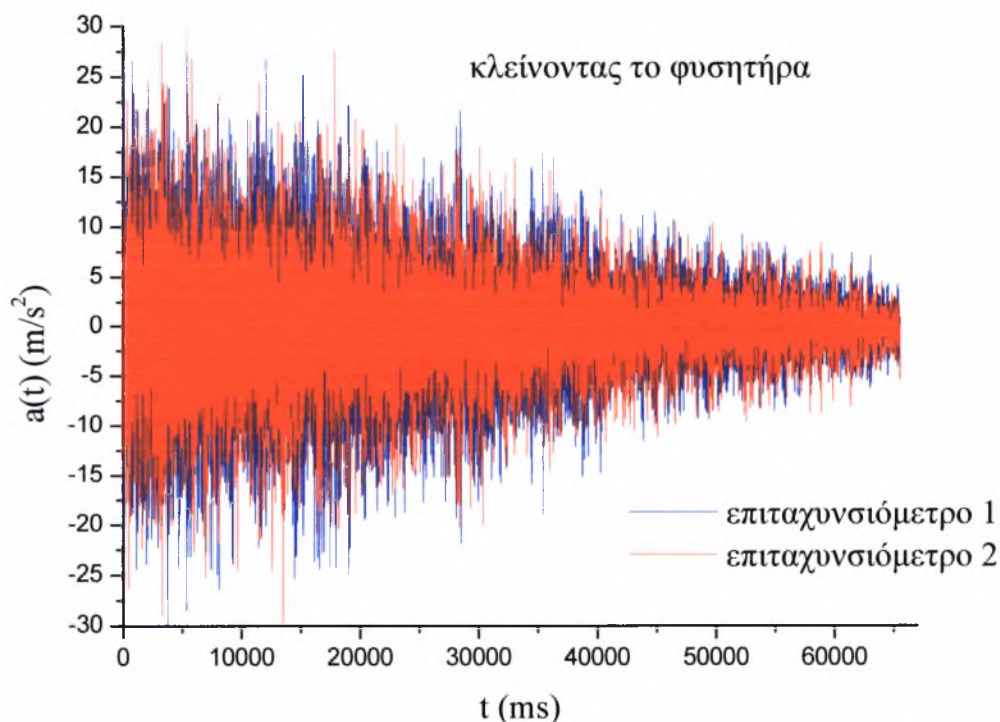


Σχήμα 5.4.14

Το παρακάτω σχήμα (5.4.15) επικεντρώνει στο χρονικό διάστημα 4 έως 4.1 δευτερόλεπτα για να γίνει πιο ορατή η διαφορά φάσης των δύο επιταχυνσιόμετρων.



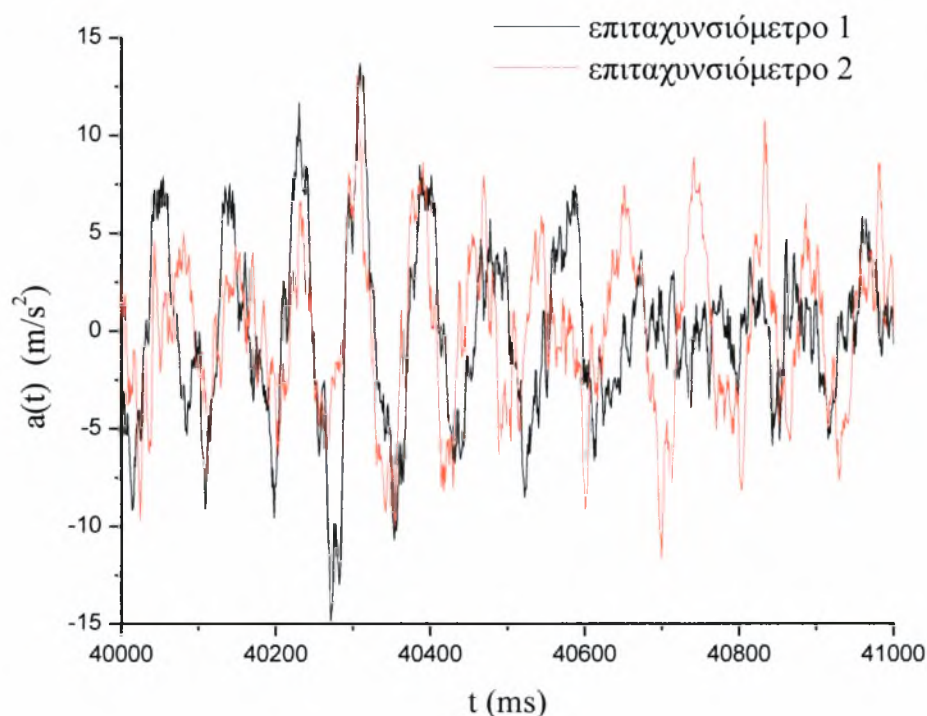
**Σχήμα 5.4.15**



**Σχήμα 5.4.16**



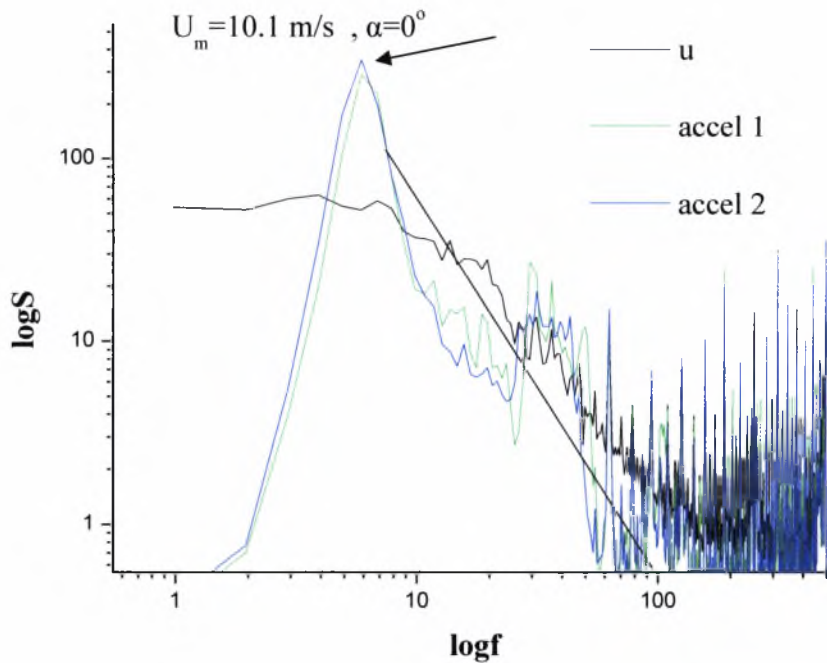
Το παρακάτω σχήμα (5.4.17) επικεντρώνει στο χρονικό διάστημα 4 έως 4.1 δευτερόλεπτα για να γίνει πιο ορατή η διαφορά φάσης των δύο επιταχυνσιομέτρων.



**Σχήμα 5.4.17**

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας με τα αντίστοιχα των επιταχύνσεων (σε λογαριθμική κλίμακα) έτσι ώστε να μπορούν να συγκριθούν.





**Σχήμα 5.4.18**

Στο παραπάνω σχήμα (5.4.18) παρατηρείται μια ισχυρή συχνότητα της τάξεως των 2 περίπου Hz ( βελάκι ) που χαρακτηρίζει την ταλάντωση της ελαστικής πτέρυγας. Αυτή η συχνότητα έχει παρατηρηθεί και στο κεφάλαιο 5.4.1. Επίσης φαίνεται ότι ο νόμος της κλίσης  $-5/3$  του φάσματος ισχύει και για το φάσμα της ταλάντωσης. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η στιγμιαία άνωση που ασκείται στην πτέρυγα κι επομένως και η ταλάντωσή της είναι εξαρτώμενες από τις στιγμιαίες διακυμάνσεις της ταχύτητας ροής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

### Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με τη θεωρία.

#### 6.1. Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών τιμών μέσου συντελεστή άνωσης για τις δύο πτέρυγες.

##### A) Ελαστική πτέρυγα.

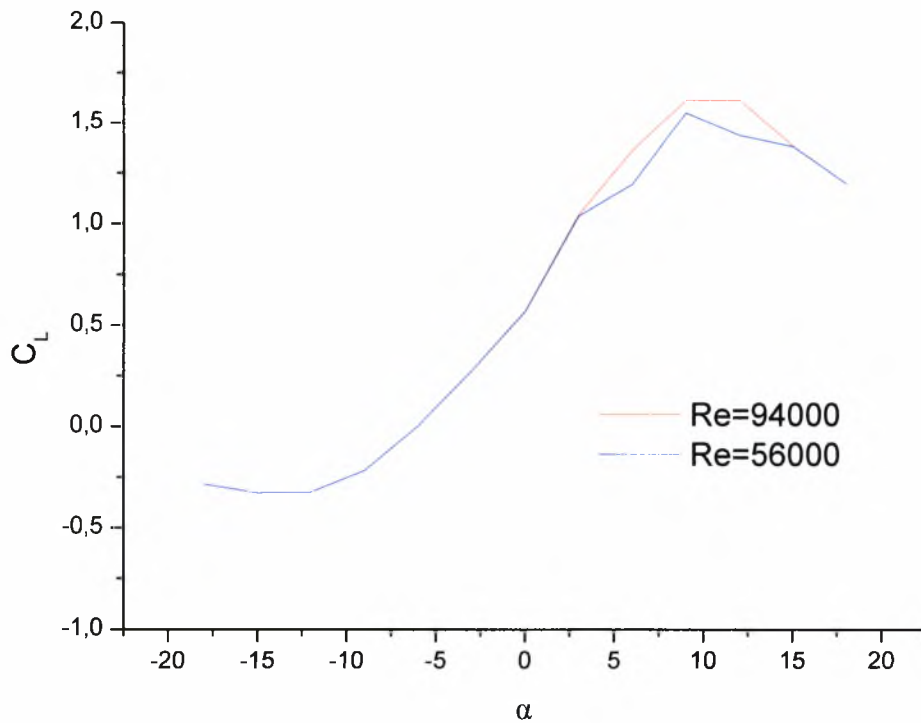
Έχει μεγάλο ενδιαφέρον η σύγκριση των μετρημένων πειραματικά τιμών συντελεστών άνωσης για τις δύο πτέρυγες με αυτές της θεωρίας για διδιάστατη ροή χωρίς τριβές.

Ο θεωρητικός προσδιορισμός του  $C_L$ , όπως έχει ήδη αναφερθεί, έγινε με τη βοήθεια στοιχείων που συνελλέγησαν από το διαδίκτυο για τις δύο πτέρυγες καθώς οι αεροτομές τους είναι τυποποιημένες από τη NASA.

#### Θεωρητικές τιμές

Η ελαστική πτέρυγα που χρησιμοποιήθηκε είναι μια πτέρυγα με αεροτομή παραπλήσια της **NACA 6205-81**. Αυτή η τυποποίηση αεροτομών γίνεται βάσει του μέγιστου ύψους της καμπύλης της αεροτομής (πρώτο ψηφίο), της οριζόντιας θέσης του μέγιστου ύψους (δεύτερο ψηφίο) και του μέγιστου πάχους της αεροτομής (τρίτο και τέταρτο ψηφίο). Όλα αυτά σαν ποσοστό του μήκους της χορδής της αεροτομής.

Έτσι υπάρχουν και γι' αυτή θεωρητικά (σε μη συνεκτική ροή) κάποια στοιχεία της αεροτομής εκ των οποίων και ο μέσος συντελεστής άνωσης σε διάφορους αριθμούς Reynolds και για διάφορες γωνίες προσπτώσεως και γωνίας βοηθητικού περυγίου. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο θεωρητικός συντελεστής άνωσης της αεροτομής συναρτήσει της γωνίας προσπτώσεως  $\alpha$  για δύο αριθμούς Reynolds που αντιστοιχούν σε ταχύτητες ροής 13 και 10 m/s, (σχήμα 6.1.1.). Τα παρακάτω στοιχεία βρέθηκαν στο διαδίκτυο από καταλόγους της NASA.



**Σχήμα 6.1.1. Θεωρητικές τιμές μέσου  $C_L$ .**

Από τη θεωρία ισχύει ότι:

$$\left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_{\text{πτερ}} = \left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_{\text{αερ}} * \frac{AR}{AR + 2}$$

$$\frac{AR}{AR + 2} = \mu = 0.7$$

$$AR = \frac{b^2}{F} = 4.67$$

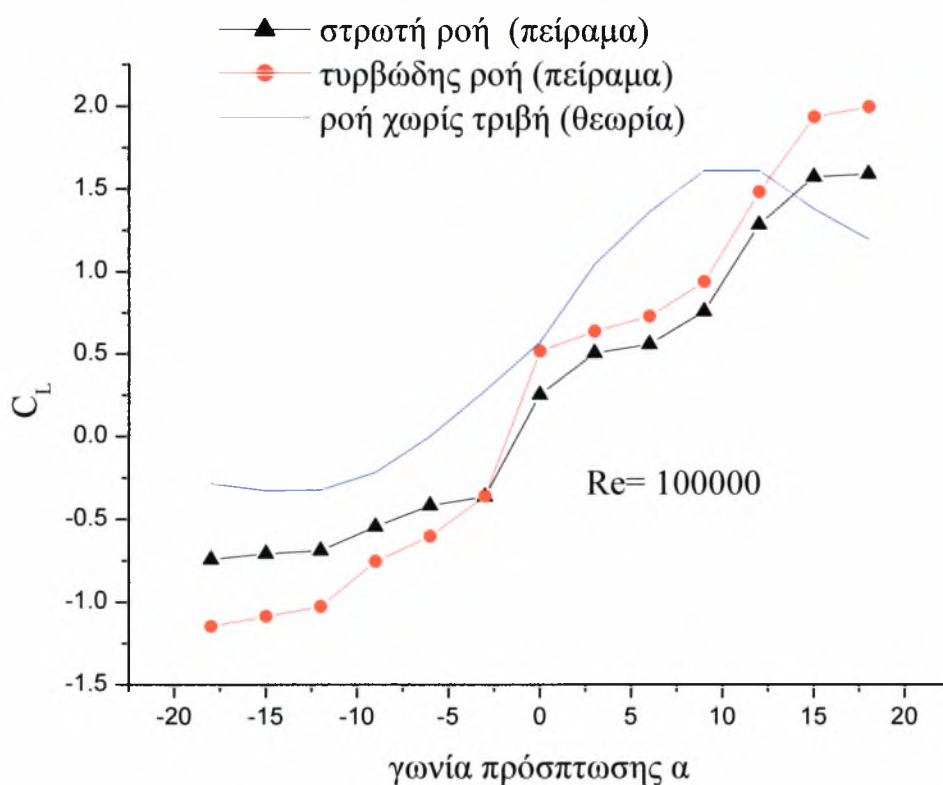
Άρα :

$$\left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_{\text{πτερ}} = \left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_{\text{αερ}} * 0.7$$

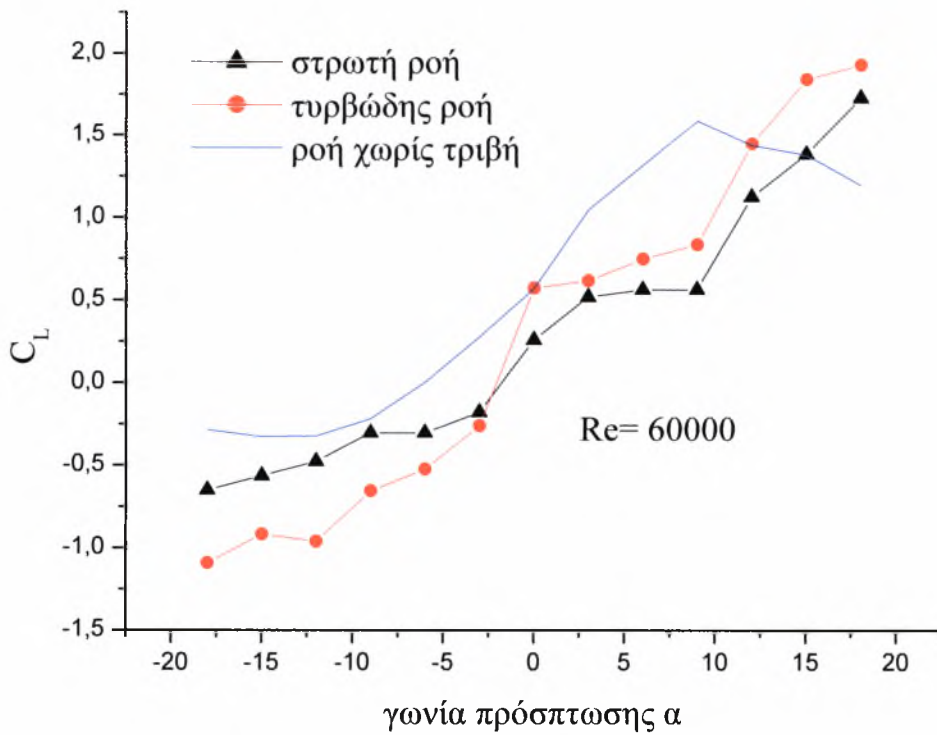
Από τα παραπάνω προκύπτει πως θα πρέπει να αναμένουμε στο διάγραμμα με τις πειραματικά μετρημένες τιμές μέσου συντελεστή άνωσης μια κλίση 70% μικρότερη σε σχέση με το διάγραμμα 6.1.1.

## Σύγκριση θεωρίας – πειράματος.

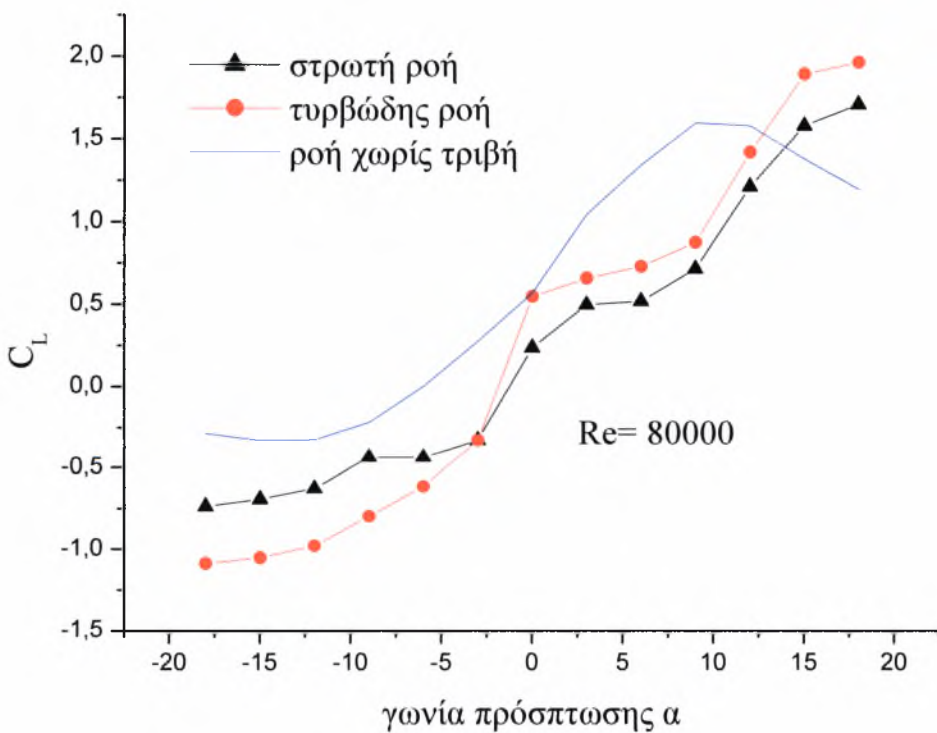
Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται παραστατικά σύγκριση του θεωρητικού συντελεστή άνωσης (σε ροή χωρίς τριβή) της αεροτομής της ελαστικής πτέρυγας (NACA 6205-81) με τις μετρηθείσες πειραματικά τιμές της πτέρυγας σε στρωτή και τυρβώδη ροή, για τρεις αριθμούς Reynolds.



Σχήμα 6.1.2. Σύγκριση θεωρίας - πειράματος.



**Σχήμα 6.1.3 . Σύγκριση θεωρίας - πειράματος.**



**Σχήμα 6.1.4. Σύγκριση θεωρίας - πειράματος.**

## Σχόλια .

Στα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερή η διαφορά στο συντελεστή άνωσης σε ροή με τριβή και ροή χωρίς τριβή. Γενικά διαπιστώνεται και στην πράξη η αρνητική επίπτωση της τριβής στις τιμές του  $C_L$ , καθώς παρατηρούνται μειωμένες έως και 30 % για τις θετικές γωνίες προσβολής. Στις αρνητικές γωνίες προσβολής παρατηρούνται γενικά μεγαλύτερες κατά μέτρο τιμές στη συνεκτική ροή.

Στην τυρβώδη ροή οι τιμές του πειραματικά μετρημένου μέσου συντελεστή άνωσης είναι μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή σε σχέση με τη στρωτή.

Τέλος , η κλίση του  $C_L$  είναι μεγαλύτερη κατά μέτρο στα πειράματα, δηλαδή η καμπύλη των πειραματικών τιμών στα παραπάνω διαγράμματα αυξάνει με μεγαλύτερο ρυθμό έναντι της καμπύλης των θεωρητικών. Αυτό οφείλεται στην ελαστικότητα (δηλαδή στο ότι η πτέρυγα κάμπτεται και αλλάζει σταδιακά κατά τον άξονα  $z$ ) της πτέρυγας και θα σχολιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

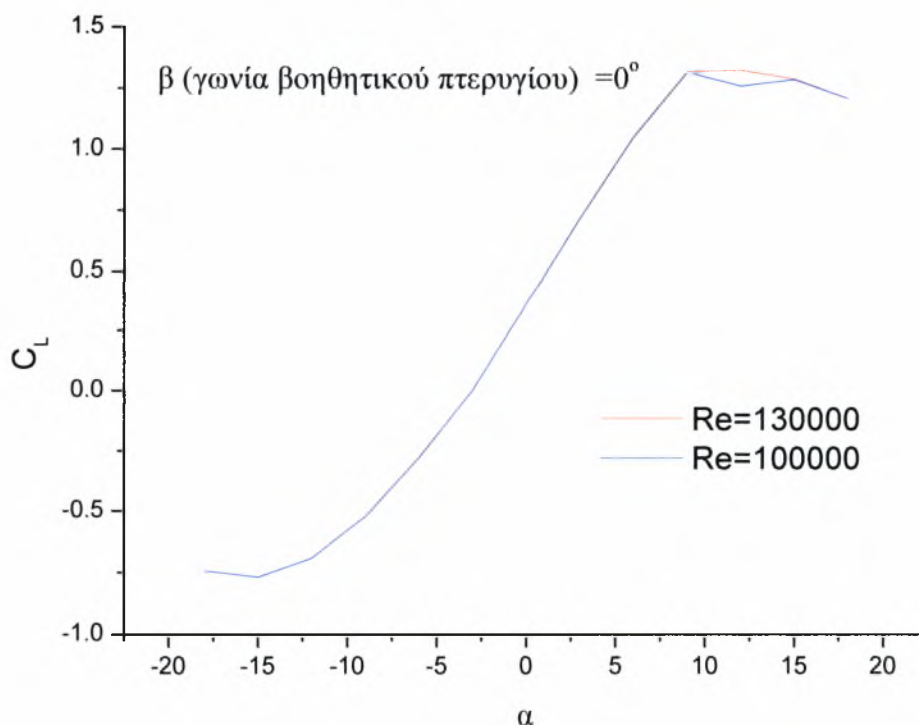


## B) Μη ελαστική πτέρυγα (άκαμπτη στερεή πτέρυγα) .

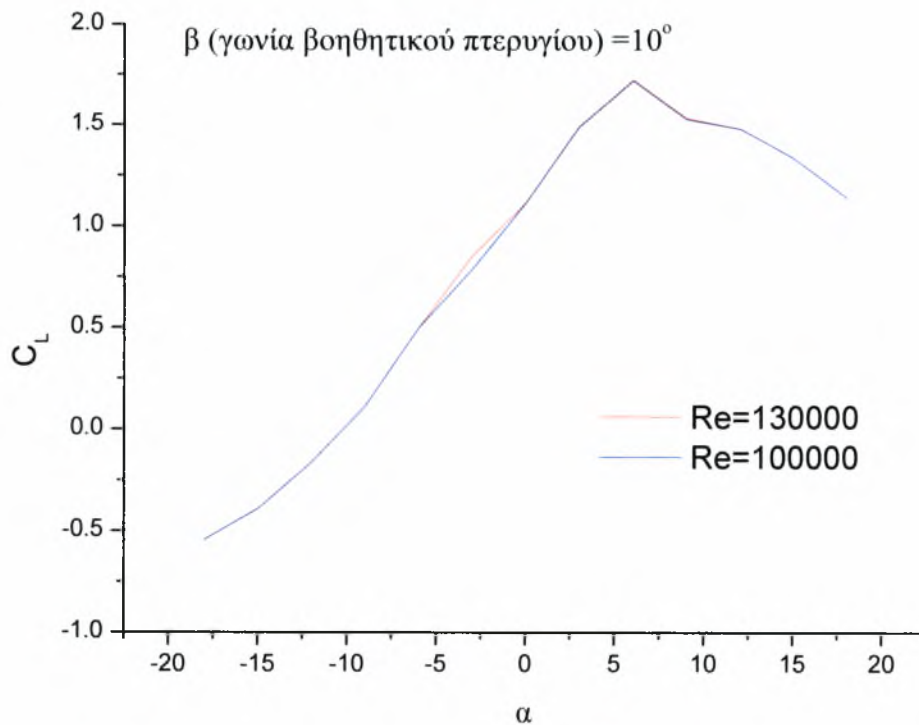
### Θεωρητικές τιμές .

Η ακλόνητη πτέρυγα που χρησιμοποιήθηκε είναι μια πτέρυγα με υπεραντωτική διάταξη (flap) της οποίας η αεροτομή έχει τυποποιηθεί από τη NASA. Συγκεκριμένα είναι η NACA 3312. Αυτή η τυποποίηση αεροτομών γίνεται βάσει του μέγιστου ύψους της καμπύλης της αεροτομής (πρώτο ψηφίο), της οριζόντιας θέσης του μέγιστου ύψους (δεύτερο ψηφίο) και του μέγιστου πάχους της αεροτομής (τρίτο και τέταρτο ψηφίο). Όλα αυτά σαν ποσοστό του μήκους της χορδής της αεροτομής .

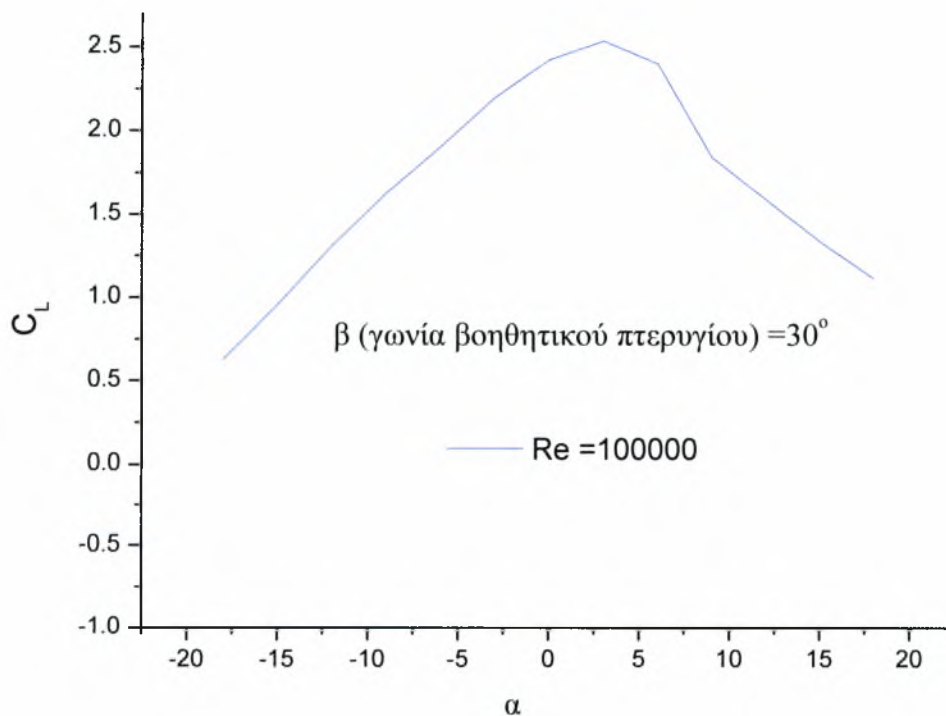
Έτσι υπάρχουν θεωρητικά κάποια στοιχεία της αεροτομής εκ των οποίων και ο συντελεστής άνωσης σε διάφορους αριθμούς Reynolds και για διάφορες γωνίες προσπτώσεως και γωνίας βοηθητικού περυγίου. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο θεωρητικός συντελεστής άνωσης της αεροτομής συναρτήσει της γωνίας προσπτώσεως  $\alpha$  για τρεις γωνίες βοηθητικού περυγίου ( $\beta=0^\circ, 10^\circ, 30^\circ$ ) και δύο αριθμούς Reynolds που αντιστοιχούν σε ταχύτητες ροής 13 και 10 m/s .



**Σχήμα 6.1.5 .Θεωρητικός συντελεστής άνωσης NACA 3312.**



**Σχήμα 6.1.6 .Θεωρητικός συντελεστής άνωσης NACA 3312.**



**Σχήμα 6.1.7 Θεωρητικός συντελεστής άνωσης NACA 3312.**

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται πως για γωνίες προσβολής άνω των 3 μοιρών (και γωνία  $\beta = 30$  μοίρες), ο μέσος συντελεστής άνωσης 'πέφτει' απότομα . Αυτό συμβαίνει λόγω αποκόλλησης της ροής υπό αυτές τις συνθήκες.

Από τη θεωρία ισχύει ότι:

$$\left( \frac{\partial CL}{\partial \alpha} \right)_{\text{πτερ}} = \left( \frac{\partial CL}{\partial \alpha} \right)_{\text{αερ}} * \frac{AR}{AR + 2}$$

$$\frac{AR}{AR + 2} = \mu = 0.5$$

$$AR = \frac{b^2}{F} = 2$$

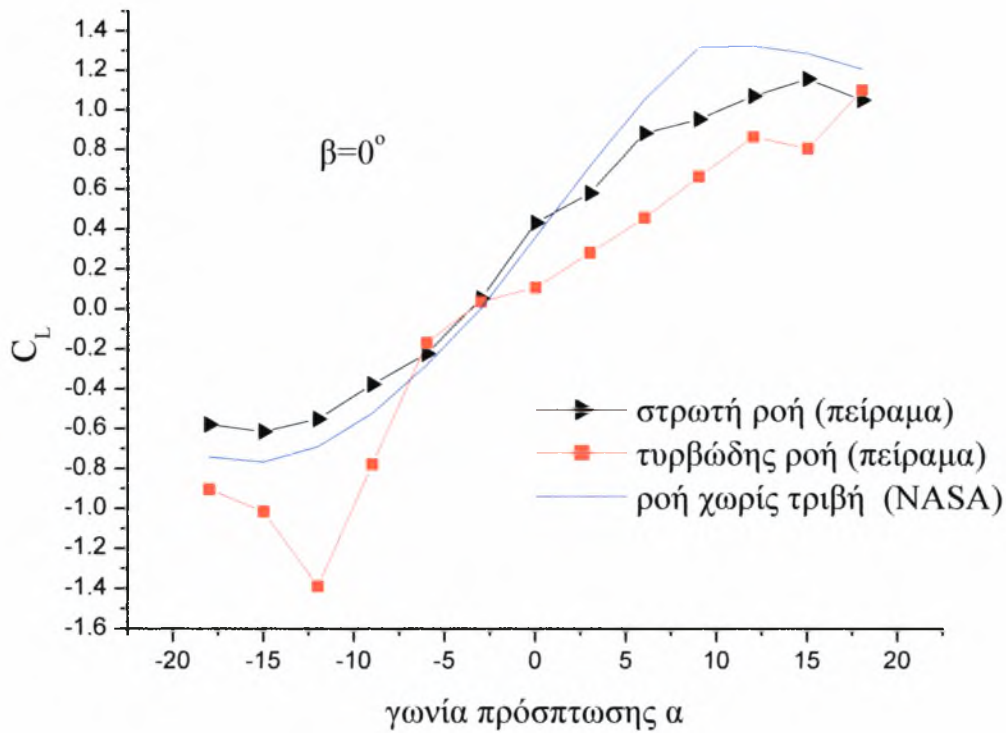
Άρα :

$$\left( \frac{\partial CL}{\partial \alpha} \right)_{\text{πτερ}} = \left( \frac{\partial CL}{\partial \alpha} \right)_{\text{αερ}} * 0.5$$

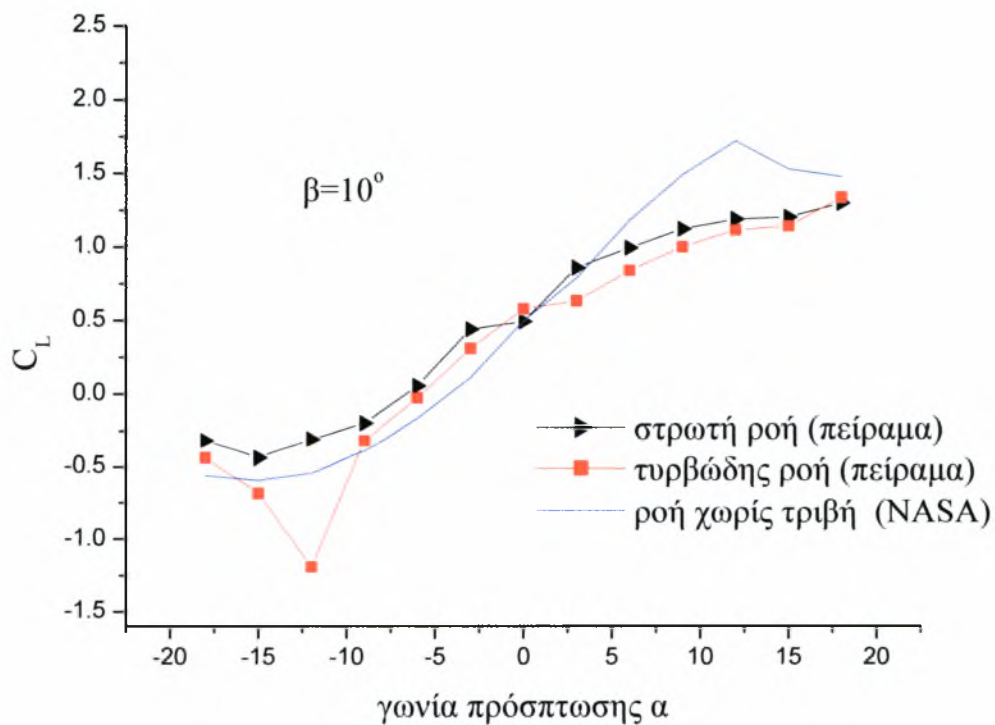
Από τα παραπάνω προκύπτει πως θα πρέπει να αναμένουμε στο διάγραμμα με τις πειραματικά μετρημένες τιμές μέσου συντελεστή άνωσης μια κλίση 50% μικρότερη σε σχέση με το διάγραμμα 6.1.7.

### Σύγκριση θεωρητικών-πειραματικών τιμών.

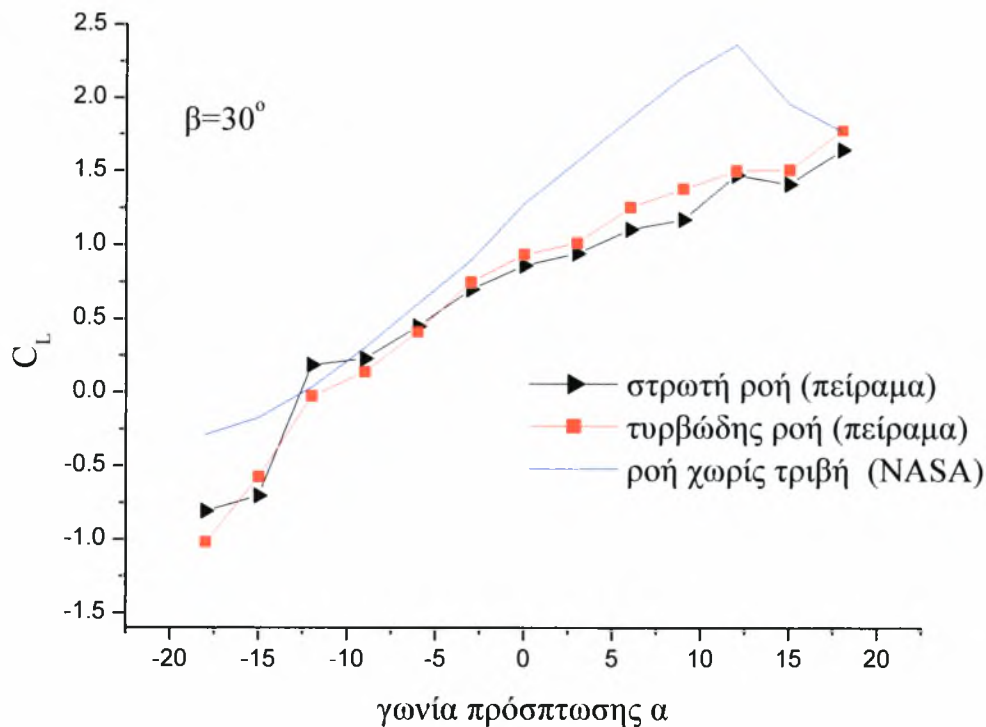
Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται παραστατικά σύγκριση του θεωρητικού (από NASA μέσου συντελεστή άνωσης (σε ροή χωρίς τριβή) της αεροτομής της μη ελαστικής (ξύλινης) πτέρυγας (NACA 3312) με τις μετρηθείσες πειραματικά τιμές της πτέρυγας σε στρωτή και τυρβώδη ροή, για αριθμό Reynolds ίσο με 90000 και τρεις γωνίες βοηθητικού πτερυγίου  $\beta$  ( $0^\circ, 10^\circ, 30^\circ$ ).



**Σχήμα 6.1.8. Μέσος συντελεστής άνωσης NACA 3312 .**



**Σχήμα 6.1.9. Μέσος συντελεστής άνωσης NACA 3312 .**



**Σχήμα 6.1.9 . Μέσος συντελεστής άνωσης NACA 3312 .**

### **Σχόλια.**

Όπως και στην ελαστική πτέρυγα γίνεται φανερή η επίδραση της τριβής στις τιμές του συντελεστή άνωσης , καθώς δρα μειώνοντάς τις σε σύγκριση με τη ροή χωρίς τριβή . Αυτό γίνεται γιατί η τριβή μετατρέπει μέρος της κινητικής ενέργειας του ρεύματος σε θερμότητα .

Επίσης παρατηρείται μια ταύτιση των τιμών ανάμεσα στη στρωτή και την τυρβώδη ροή , κυρίως για γωνίες βοηθητικού περυγίου 10 και 30 μοίρες .

Εδώ δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην κλίση του συντελεστή άνωσης , μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών.

Αυξάνοντας τη γωνία βοηθητικού περυγίου  $\beta$  , παρατηρείται μία αυξανόμενη απόκλιση των πειραματικών τιμών έναντι των θεωρητικών. Αυτό οφείλεται σε αποκολλήσεις που υφίσταται η ροή , ιδιαίτερα στις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.

### Συμπεράσματα-παρατηρήσεις.

#### Μετρήσεις συντελεστή άνωσης

##### **Ελαστική πτέρυγα.**

-Παρατηρούνται , όπως είναι αναμενόμενο από τη θεωρία ( τυρβώδους οριακού στρώματος και αεροδυναμικής) , μεγαλύτερες τιμές συντελεστή άνωσης στην τυρβώδη ροή σε σύγκριση με τη στρωτή. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο πάχος του τυρβώδους οριακού στρώματος , το οποίο εμφανίζει το προφίλ της πτέρυγας πιο παχύ και αυτό έχει αυξητικές συνέπειες στο συντελεστή άνωσης.

-Επίσης , παρατηρείται μια πιο απότομη κλίση του συντελεστή άνωσης εν συγκρίσει με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στην ελαστικότητα της πτέρυγας η οποία έχει ως συνέπεια τη στρέψη της από τα ανωστικά φορτία. Έτσι παρατηρείται μία υποεκτίμηση στην τιμή της γωνίας προσβολής κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα στο σημείο στήριξης η γωνία μετριόταν κάποιες μοίρες , αλλά στα ακροπτερύγια και λόγω της στρέψης της πτέρυγας ήταν μεγαλύτερη κατά μέτρο.

-Δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση της ροής (ύστερα από απεικόνισή της με καπνό ) ακόμα και σε μεγάλες γωνίες προσπτώσεως ( $18^\circ$ ). Αυτό οφείλεται επίσης στην ελαστικότητα της πτέρυγας και στην προσαρμοστικότητα της γεωμετρίας της στις συνθήκες ροής και στη μορφή του οριακού στρώματος στην επιφάνειά της. Δηλαδή μπορούμε να πούμε πως το σχήμα της πτέρυγας ‘προσαρμοζόταν’ κατά κάποιο τρόπο έτσι ώστε να μην αποκολλάται το οριακό στρώμα τόσο στην τυρβώδη όσο και στη στρωτή ροή.

##### **Μη ελαστική πτέρυγα.**

-Στη μη ελαστική πτέρυγα τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων για το συντελεστή άνωσης μπορούμε να πούμε ότι συνέπεπταν με τα θεωρητικά (από καταλόγους της NASA και Javafoil) καθώς εδώ δεν υπεισέρχονταν αστάθειες λόγω αλλαγής σχήματος ή ταλαντώσεων .



Κάποιες αποκλίσεις παρατηρήθηκαν για μεγάλες γωνίες βοηθητικού πτερυγίου (flap) όπου οι αστάθειες αυξάνονται λόγω αποκολλήσεων στα οριακά στρώματα.

Επίσης, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, παρατηρήθηκε η ευεργητική συνεισφορά του βοηθητικού πτερυγίου στις τιμές του συντελεστή άνωσης καθώς επέφερε αύξηση έως και 55%.

## Ελαστική πτέρυγα.

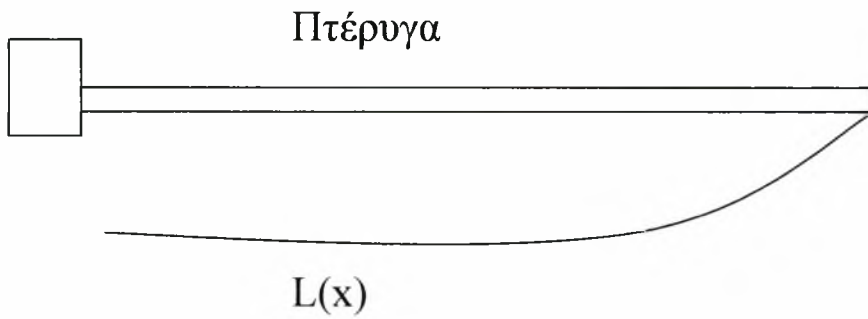
- Παρατηρήθηκε πως τα φάσματα των συχνοτήτων της ταλάντωσης των ακροπτερυγίων στη λογαριθμική κλίμακα υπακούουν στο νόμο των  $5/3$  του φάσματος Kolmogorow, όπως και τα αντίστοιχα φάσματα των ταχυτήτων για την τυρβώδη ροή. Αυτό ήταν αναμενόμενο διότι η ταλάντωση εξαρτάται ευθέως από την ανωστική δύναμη της οποίας οι διακυμάνσεις είναι ανάλογες του τετραγώνου των διακυμάνσεων της ταχύτητας.

-Μετρώντας το βέλος κάμψης του ακροπτερυγίου της πτέρυγας σε διάφορα ανωστικά φορτία διαπιστώθηκε πως η κατανομή της άνωσης κατά μήκος της δεν είναι ομοιόμορφη. Πιο συγκεκριμένα, δίνοντας ένα παράδειγμα, ξέρουμε ότι το βέλος κάμψης για ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο για τη μονόπακτη δοκό είναι :

$$\beta . \kappa . = - \frac{q_0 * L^4}{8 * E * I}$$

όπου :  $q_0$  = το κατανεμημένο φορτίο σε N/m,  $L$  = μήκος σε m,  $E$  = μέτρο ελαστικότητας σε Pa,  $I$  = ροπή αδράνειας.

Θεωρώντας το ήμισυ της πτέρυγας ως μονόπακτη δοκό, μετρήσαμε για ανωστική δύναμη 1.5 N και μήκος 0.245 m βέλος κάμψης ίσο με 6 mm, ενώ θεωρητικά για ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο θα έπρεπε να μετρηθεί βέλος κάμψης ίσο με 8.1 mm. Άρα συμπεραίνουμε πως η άνωση δεν είναι κατανεμημένη ομοιόμορφα κατά μήκος της πτέρυγας. Η πιθανή κατανομή της είναι με ελαφρά μειούμενη τιμή άνωσης πλησιάζοντας τα ακροπτερύγια. Έχει δηλαδή ποιοτικά την παρακάτω κατανομή:



Για ακριβέστερο υπολογισμό της κατανομής θα ήταν αναγκαία η κατανομή του βέλους κάμψεως. Πάντως αυτή η κατανομή ήταν αναμενόμενη λόγω του οριακού στρώματος στα τοιχώματα της μετρητικής διαδρομής .

## Ευχαριστίες

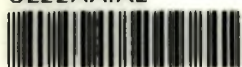
Για την βοήθειά τους στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής , ευχαριστώ τους : κ.Ερρίκο Σταπουντζή (Αν. Καθηγητή ) επιβλέποντα της διπλωματικής , κ.Παπαδημητρίου Κων/νο (Αν. Καθηγητή Δυναμικής των κατασκευών) για τον δανεισμό μετρητικών οργάνων και για τη συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή , κ. Π. Τσιακάρα (Επ. Καθηγητής) για τη συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή , τον κ. Ν. Βλάχο ( Καθηγητή ) ως υπεύθυνο του εργαστηρίου ρευστομηχανικής και τον διδάκτορα Μ. Αλυγιζάκη για την αμέριστη βοήθεια του σε θέματα προγραμματισμού.

## Βιβλιογραφία.

Αεροδυναμική του συμπιεστού ρευστού , Σ. Τσαγγάρης .  
Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου , Peter Elgar .  
Αντοχή υλικών , Κερμανίδης .  
Απειροστικός λογισμός , Thomas – Finney .  
Διαφορικές εξισώσεις , Σ. Τραχανάς.  
Εφαρμοσμένη δυναμική , Σ. Νατσιάβας .  
Εφαρμοσμένη στατιστική , Δ. Ψωινός .  
Μηχανική παραμορφώσιμων σωμάτων , Γ. Τσαμασφύρος.  
Μηχανική ρευστών , Streeter / Wylie .  
Μηχανική των ρευστών , Σ. Τσαγγάρης.  
Προγραμματισμός Fortran 90/95 , Ματαράς – Κουτελιέρης .  
Συμπιεστή και ασυμπίεστη αεροδυναμική , Ερ . Σταπουντζής.  
Υπολογιστική ρευστοδυναμική , Μαρκάτος – Ασημακόπουλος.  
Φαινόμενα τύρβης , Ερ . Σταπουντζής.  
American Institute of Aerospace.  
Journal of fluid mechanics.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085879